



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

ALPI ROISKO
PALKKIKAISTOJEN KÄYTTÖ TERÄSBETONILAATAN MITOITUK-
SESSA

Kandidaatintyö

Toukokuu 2018

Tarkastaja: Yliopistonlehtori Olli Ke-
rokoski

TIIVISTELMÄ

ALPI ROISKO: Palkkikaistojen käyttö teräsbetonilaatan mitoituksessa (Strong Bands and Strip Method in Reinforced Concrete Slab Design.)

Tampereen teknillinen yliopisto

Kandidaatintyö, 27 sivua, 8 liitesivua

Toukokuu 2018

Rakennustekniikan kandidaatin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Talonrakentaminen

Tarkastaja: Yliopistonlehtori Olli Kerokoski

Avainsanat: teräsbetonilaatta, mitoitus, taivutusraudoitus, palkkikaista, kaistamenetelmä

Palkkikaistat ovat teräsbetonilaatassa sijaitsevia kaistoja, jotka raudoitetaan muuta laatkaa voimakkaammin. Palkkikaistoja käytetään teräsbetonilaatassa silloin, kun laatassa on suuria aukkoja tai muita vapaita reunoja. Näiden voimakkaammin raudoitettujen palkkikaistojen tarkoituksena on kuljettaa laatalta tulevat kuormitukset tuille. Palkkikaistan leveyden tulee olla sellainen, että se pystyy vastaanottamaan sille tulevan kuormituksen vahingoittumatta.

Palkkikaistoja käytetään kaistamenetelmän yhteydessä. Kaistamenetelmän avulla voidaan ratkaista kuormituksen jakautuminen ristiin kantavissa teräsbetonilaatoissa. Ristiin kantava laatta on kahdessa toisiaan kohtisuorassa suunnassa taivutettu ja tuettu useammalta kuin kahdelta sivulta. Kaistamenetelmä on erittäin toimiva tapa ratkaista laatan kuormituksen jakautuminen erityisesti silloin, kun laatassa sijaitsee vapaita reunoja tai suuria aukkoja. Kun kuormitusjakauma tiedetään laatussa, voidaan laskea pääraudoituksen mitoitukseen tarvittavat taivutusmomentit.

Teräsbetonilaatan taivutusraudoitusmäärään vaikuttaa taivutusmomentin arvon lisäksi laatan paksuus, käytettävien materiaalien lujuudet sekä laatan tuentatapa. Laatan paksuus valitaan yleensä palonkestävyys- ja ilmääneneristävyysstandardien mukaan. Laatan paksuus valitaan usein myös sellaiseksi, että leikkausraudoitusta ei tarvita. Jos suorakaide-laatta on tuettu jokaiselta neljältä sivulta vapaasti, taivutusraudoitusta tarvitaan ainoastaan laatan alapintaan. Jäykkien tukien läheisyyteen syntyy vetotaivutusta myös laatan yläpintaan, joten silloin on tarvetta myös yläpinnan taivutusraudoitukselle.

Teräsbetonilaatan suunnittelijalta vaaditaan sekä taivutusraudoituksen määrittämiseen tarvittavien kaavojen ymmärtämistä, että rakenteen statiikan hallitsemista. Rakenteen mitoittajan on ymmärrettävä, miten kuormitukset jakautuvat ristiin kantavissa laatoissa, miten maksimitaivutusmomentit ratkaistaan tuki- ja kenttäalueilla sekä miten taivutusmomenttikuvion nollakohdat lasketaan.

ALKUSANAT

Haluaisin ensimmäiseksi kiittää kandidaatintyöni ohjaajaa ja tarkistajaa Olli Kerokoskea, joka on auttanut minua työni kanssa aina, kun on ollut tarvetta. On ollut erityisen tärkeää, että Kerokoski on vastannut yhteydenottoihin nopeasti ja vastaanottoaikoja olen saanut, aina kun olen niitä tarvinnut.

Kiitän myös Tampereen teknillistä yliopistoa ja sen tarjoamia palveluita, jotka ovat olleet minulle vapaasti ja ilmaiseksi käytettävissä. Olen saanut kampuksen kirjastosta tutkimukseeni paljon tärkeitä tiedonlähteitä ilmaiseksi ja saamani tiedonhankintakoulutus oli tarpeellinen. Eurokoodit ovat olleet minulle myös tärkeä tiedonlähde ja niiden maksuton käyttö on ollut suuri etu.

Tampereella, 10.5.2018

Alpi Roisko

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	TERÄSBETONILAATAN MITOITUKSEN PERIAATE	2
2.1	Murtorajatila	2
2.1.1	Kuormitukset ja niiden osavarmuusluvut	2
2.1.2	Materiaalit ja niiden osavarmuusluvut	3
2.2	Mitoitus taivutukselle	5
2.2.1	Yleistä taivutusmitoituksesta	5
2.2.2	Pääraudoituksen määrittäminen	5
2.2.3	Vähimmäispääraudoitus	7
3.	KAISTAMENETELMÄ JA PALKKIKAISTAT	8
3.1	Ristiin kantavat laatat	8
3.2	Kaistamenetelmän periaate	8
3.3	Laatan jako laattakaistoihin	9
3.3.1	Neljältä reunalta vapaasti tuettu laatta	9
3.3.2	Kahdelta reunalta jäykästi tuettu laatta	10
3.4	Palkkikaistat	12
3.4.1	Palkkikaistat vapaareunallisessa laatussa	12
3.4.2	Palkkikaistat aukollisessa laatussa	13
4.	PALKKIKAISTOJEN KÄYTTÖ MITOITUKSESSA	16
4.1	Vapaa reuna teräsbetonilaatussa	16
4.1.1	Vapaareunallisen laatan lähtötiedot ja paksuuden valinta	16
4.1.2	Vapaareunallisen laatan kuormitukset	16
4.1.3	Vapaareunallisen laatan maksimitaivutusmomentit	18
4.1.4	Vapaareunallisen laatan pääraudoitus	20
4.2	Porrasaukko teräsbetonilaatussa	21
4.2.1	Porrasaukollisen laatan lähtötiedot ja paksuuden valinta	21
4.2.2	Porrasaukollisen laatan kuormitukset	21
4.2.3	Porrasaukollisen laatan maksimitaivutusmomentit	23
4.2.4	Porrasaukollisen laatan pääraudoitus	25
5.	YHTEENVETO	26
	LÄHTEET	27

LIITE A: PORRASAUKOLLISEN LAATAN MAKSIMITAIVUTUSMOMENTIT

LYHENTEET JA MERKINNÄT

A_s	poikkileikkaukseen vaadittava taivutusraudoitusmäärä
A_{sI}	yksittäisen terästangon poikkipinta-ala
$A_{s,min}$	vähimmäispääraudoitusmäärä
b	taivutusraudoituksen mitoituksessa poikkipinta-alan leveys
b_m	pidemmän palkkikaistan leveys aukollisessa laatasta
c	laatan suojabetonikerroksen paksuus
d	laatan poikkipinta-alan tehollinen korkeus
f_{cd}	betonin puristuslujuuden mitoitusarvo (lieriölujuus)
f_{ck}	betonin puristuslujuuden ominaisarvo (lieriölujuus)
f_{ctm}	betonin keskimääräinen vetolujuus
f_{yd}	teräksen vetolujuuden mitoitusarvo
f_{yk}	teräksen vetolujuuden ominaisarvo
G_k	pysyvän kuorman ominaisarvo
h_L	laatan paksuus
L_x	laatan lyhyemmän sivun pituus
L_y	laatan pidemmän sivun pituus
K_{FI}	rakenteen luotettavuusluokasta riippuva kerroin
m_d	mitoitusmomentti
m_f	laatan kenttämomentti tietyssä suunnassa
m_s	laatan tukimomentti tietyssä suunnassa
q_d	rakenteeseen vaikuttavan kuorman mitoitusarvo
Q_k	muuttuvan kuorman ominaisarvo
R	tukivoima
R_m	tuki- ja kenttämomentin suhde
z	poikkileikkauksen sisäinen momenttivarsi
\varnothing_{raud}	yksittäisen terästangon halkaisija
α	kaistamenetelmässä käytettävä parametri, joka määrittää laattakaistojen leveyden nurkka-alueilla sekä tuki- ja kenttämomenttien arvon
α_{cc}	kerroin, joka ottaa huomioon betonin puristuslujuuteen vaikuttavat pitkäaikaistekijät ja kuorman vaikutuksesta aiheutuvat epäedulliset tekijät
β	puristuspinnan suhteellinen korkeus
γ_C	betonin osavarmuusluku
γ_G	pysyvän kuorman osavarmuusluku
γ_Q	muuttuvan kuorman osavarmuusluku
γ_S	betoniteräksen osavarmuusluku
μ	suhteellinen momentti
μ_b	tasapainoraidoitettun poikkileikkauksen suhteellinen momentti
ψ_0	muuttuvien kuormien pienennyskerroin

1. JOHDANTO

Teräsbetoni-laattoja käytetään rakennuksissa ala-, ylä- tai välipohjarakenteina. Laattojen tarkoituksena on siirtää niihin kohdistuvat kuormat ja laatan oma paino kantaville rakenteille, kuten pilareille, palkeille ja seinille. Teräsbetoni-laattojen mitoitus on yhtä tärkeää kuin minkä tahansa muun rakenteen mitoittaminen. Laatan kuormien jakautumiseen ja taivutusmomenttien ratkaisemiseen on olemassa useita eri menetelmiä. Tässä kandidaattityössä tutkitaan laatan kuormituksien jakautumista sekä laatan mitoittamista kaistamelmällä ja palkkikaistojen avulla.

Tämän kandidaattityön tutkimusongelmana on, miten teräsbetoni-laatta tulee raudoittaa, jos laatussa on aukkoja tai muita vapaita reunoja. Nämä vapaat reunat vaativat enemmän raudoitusta kuin, mitä muualla laatussa on. Tutkimuksen tavoitteena on osoittaa kahden esimerkkilaskelman avulla, miten teräsbetoni-laatta tulee mitoittaa ja raudoittaa sekä palkki- että laattakaistojen kohdalta ja tutkita, miten vapaiden reunojen sijainti laatussa vaikuttaa vaadittavaan raudoitusmäärään. Työn tavoitteena on myös antaa teräsbetonirakenteiden mitoituksesta kiinnostuneille valmiudet taivutusraudoituksen mitoitukseen ja tietoa ristiin kantavien laattojen toiminnasta.

Tutkimus alkaa teoriaosuudella, missä lukijalle kerrotaan, mikä on murtorajatila, mitkä ovat eri kuormitusyhdistelmien osavarmuusluvut ja mitä osavarmuuslukuja materiaaleille on määritetty murtorajatilassa. Tämän jälkeen käydään läpi, mitä valintoja suunnittelijan tulee tehdä ennen laatan pääraudoituksen mitoitusta ja mitä eri kaavoja suunnittelija tarvitsee pääraudoituksen määrittämiseen.

Luvussa 3 käsitellään kuormituksen jakautumista ristiin kantavissa laatoissa kaistamelmällä sekä palkkikaistojen käyttöä. Näiden pohjustuksien jälkeen ratkaistaan tutkimusongelma kahden esimerkkilaskun avulla, miten raudoitusmäärä eroaa laatussa palkkikaistojen kohdassa.

Tässä kandidaattityössä tutkitaan ainoastaan massiivilaattojen mitoittamista, eikä se ota kantaa esimerkiksi ontelo- tai ripalaattojen mitoitukseen. Sen lisäksi laatan maksimitaivutusmomentit lasketaan käsilaskennan avulla, eikä apuna käytetä esimerkiksi tietokoneohjelmia.

2. TERÄSBETONILAATAN MITOITUKSEN PERIAATE

Teräsbetonilaatat mitoitetaan tavallisesti vain taivutukselle, koska laattaan vaikuttavat leikkausvoimat ovat yleensä leikkauskestävyyttä pienemmät (Nykyri 2015, s. 11). Laatat mitoitetaan taivutukselle murtorajatilassa, jolloin laattaan vaikuttavissa kuormissa ja materiaalien lujuuksissa otetaan huomioon osavarmuuslukujen vaikutus.

2.1 Murtorajatila

Murtorajatilaksi kutsutaan tilaa, jossa rakenteessa alkaa tapahtua murtumista tai muuta senkaltaista vaurioitumistapaa. Kaikki rajatilat, jotka vaikuttavat ihmisten turvallisuuteen ja rakenteiden varmuuteen, tulee luokitella murtorajatiloiksi (SFS-EN 1990 2010, s. 52).

Teräsbetonilaatassa murtorajatila saavutetaan esimerkiksi silloin, kun laattaan syntyvä taivutus aiheuttaa vetoa laatan alapintaan. Betonin heikon vetolujuuden seurauksena laatan alapintaan syntyy halkeamia, jolloin rakenne ei pysty toimimaan enää yksinään. Tällöin osa laattaan aiheutuvasta vedosta siirtyy alapinnassa oleville teräksille.

2.1.1 Kuormitukset ja niiden osavarmuusluvut

Murtorajatilamitoituksessa ei saa käyttää rakenteeseen vaikuttavien kuormien ominaisarvoja. Ominaisarvot pitää kertoa osavarmuusluvuilla, jotta saadaan ominaisarvot muutettua mitoitusarvoiksi. Näitä mitoitusarvoja käytetään murtorajatilamitoituksessa.

Teräsbetonilaattaan vaikuttaa yhtäaikaaisesti monia kuormia, jotka voidaan jakaa pysyviin kuormiin G , muuttuviin kuormiin Q ja onnettomuuskuormiin A (SFS-EN 1990 2010, s. 58). Pysyvät kuormat vaikuttavat rakenteessa koko sen käyttöajan ajan esimerkiksi laatan oma paino luokitellaan pysyväksi kuormaksi. Muuttuvat kuormat nimensä mukaisesti muuttuvat rakenteessa koko käyttöajan aikana. Laatan toimiessa välipohjana laattaan vaikuttaa asumisesta aiheutuvia hyötykuormia muun muassa käveleminen ja huonekalujen siirtäminen. Yläpohjalaattaan vaikuttaa lumen aiheuttama lumikuorma, joka luokitellaan myös muuttuvaksi kuormaksi. Rakenteisiin vaikuttavat räjähdykset, maanjäristykset ja ajoneuvojen törmäykset luokitellaan onnettomuuskuormiksi, joita ei käsitellä tässä tutkimuksessa.

Kuormitusyhdistelmien mitoitusarvo lasketaan kaavalla

$$q_d = K_{FI}\gamma_G G_k + K_{FI}\gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i>1} K_{FI}\gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,n}, \quad (1)$$

missä K_{FI} on luotettavuusluokasta riippuva kerroin, γ_G on pysyvän kuorman osavarmuusluku, γ_Q on muuttuvat kuorman osavarmuusluku ja ψ_0 muuttuvien kuormien pienennyskerroin (SFS-EN 1990 2010, s. 80).

Normaalisti vallitsevassa mitoitustilanteessa käytetään pysyvän kuorman osavarmuusluku $\gamma_G = 1,35$ ja muuttuvia kuormia ei oteta mitoitusarvon laskennassa huomioon. Tilapäisessä mitoitustilanteessa osavarmuuskertoimet muuttuvat, koska muuttuvat kuormat otetaan mitoitusarvossa huomioon. Pysyvien kuormien osavarmuuskertoimena käytetään $\gamma_G = 1,15$ ja muuttuvien kuormien osavarmuusluku $\gamma_Q = 1,5$. (SFS-EN 1990 2010, s. 80)

Kaavassa 1 esiintyvän kertoimen K_{FI} arvo riippuu siitä, ovatko vauriot vahingon syntyessä suuria vai pieniä. Tavanomaisissa rakenteissa käytetään arvoa $K_{FI} = 1,0$. (SFS-EN 1990 2010, s. 138)

Rakenteeseen voi vaikuttaa yhtäaikaaisesti useampia muuttuvia kuormia. On hyvin epätodennäköistä, että kaikki muuttuvat kuormat vaikuttaisivat täydellä teholla samanaikaisesti. Tämän vuoksi määräävä muuttuva kuorma kerrotaan osavarmuusluvulla ja muut muuttuvat kuormat osavarmuuskertoimen lisäksi pienennyskertoimella ψ_0 , joka esiintyy kaavassa 1. Pienennyskerroin riippuu siitä, minkälainen kuormitus on kyseessä. Esimerkiksi asuintilojen hyötykuormille ja lumikuormalle käytetään arvoa 0,7 ja tuulikuormalle 0,6 (SFS-EN 1990 2010, s. 86).

Teräsbetoni laatat toimivat rakennuksissa ala-, väli- tai yläpohjarakenteina, jolloin niihin yleensä kohdistuu omapainon lisäksi ainoastaan yhtä hyötykuormaa, esimerkiksi välipohjalaatalle asumisesta aiheutuvaa hyötykuormaa. Tällöin kaava 1 saadaan muotoon (olettaen, että $K_{FI} = 1,0$)

$$q_d = \max \left\{ \begin{array}{l} 1,35 \cdot G_k \\ 1,15 \cdot G_k + 1,5 \cdot Q_k \end{array} \right. \quad (2)$$

Mitoituskuormaksi valitaan näistä kahdesta suurempi arvo. Useimmissa tapauksissa tilapäisesti mitoitustilanteesta tulee määräävämpi.

Teräsbetoni laattojen omapaino saadaan kertomalla betonin laskennassa käytetty tilavuuspaino teräsbetoni laatan paksuudella (SFS-EN 1991-1-1 2011, s. 46). Teräsbetoni laatan hyötykuorman arvo riippuu laatan käyttötarkoituksesta. Esimerkiksi asuinrakennuksen välipohjan hyötykuorman ominaisarvo on $2,0 \text{ kN/m}^2$. (SFS-EN 1991-1-1 2011, s. 30)

2.1.2 Materiaalit ja niiden osavarmuusluvut

Teräsbetonirakenteiden toiminta perustuu betonin hyvään puristuslujuuteen ja terästen suureen myötölujuuteen. Kun rakenteeseen kohdistuva vetojännitys ylittää betonin vetolujuuden, betoniin syntyy halkeamia ja teräkset ottavat vedon vastaan.

Betonin puristuslujuus esitetään betonin lujuusluokkien avulla, missä esitetään betonin lieriölujuuden ja kuutiolujuuden ominaisarvot. Esimerkiksi betonin C30/37 lieriölujuus on $f_{ck} = 30$ MPa ja kuutiolujuus $f_{ck,cube} = 37$ MPa. Standardin EN 1992-1-1 mukaiset lujuusluokat perustuvat 28 vuorokauden ikäisen betonin lieriölujuuteen. Taulukossa 1 on esitetty betonin lujuusominaisuudet lujuusluokkaan C50/60 asti.

Taulukko 1. Betonin lujuusluokat ja -ominaisuudet (SFS-EN 1992 2015, s. 30).

f_{ck} (MPa)	12	16	20	25	30	35	40	45	50
$f_{ck, cube}$ (MPa)	15	20	25	30	37	45	50	55	60
f_{cm} (MPa)	20	24	28	33	38	43	48	53	58
f_{ctm} (MPa)	1,6	1,9	2,2	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8	4,1
$f_{ctk, 0,05}$ (MPa)	1,1	1,3	1,5	1,8	2,0	2,2	2,5	2,7	2,9
$f_{ctk, 0,95}$ (MPa)	2,0	2,5	2,9	3,3	3,8	4,2	4,6	4,9	5,3

Teräsbetonilaatan pääraudoituksen mitoitukseen tarvitaan kahta betonin lujuusominaisuutta: puristuslujuutta f_{ck} ja keskimääräistä vetolujuutta f_{ctm} . Puristuslujuutta käytetään pääraudoituksen mitoituksessa ja keskimääräistä vetolujuutta minimipääraudoituksen määrittämisessä.

Teräsbetonirakenteissa käytetään pääosin kylmämuokattuja tai kuumavalssattuja harjatankoja, joiden myötölujuudet f_{yk} ovat 400–600 MPa (Suomen betoniyhdistys 1995, s. 17). Betoniteräksien myötölujuudet ilmoitetaan niiden tunnuksissa. Esimerkiksi hitsattavan kuumavalssatun harjatangon B500B myötölujuus on $f_{yk} = 500$ MPa.

Kuten kuormituksille, myös materiaalien lujuuksille on määritelty osavarmuusluvut, joita käytetään murtorajatilassa. Betonin ja betoniteräksen osavarmuusluvut on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Betonin ja teräksen osavarmuusluvut (SFS-EN 1992 2015, s. 26).

Mitoitustilanne	Betoni	Betoniteräs
Normaalisti vallitseva ja tilapäinen	1,5	1,15
Onnettomuus	1,2	1,0

Betonin puristuslujuuden mitoitusarvo lasketaan kaavalla

$$f_{cd} = \alpha_{cc} \cdot f_{ck} / \gamma_c, \quad (3)$$

missä α_{cc} on pitkäaikaistekijät ja muut epäedulliset tekijät huomioon ottava kerroin. Kerroimen arvo on 0,8–1,0 maasta riippuen. Suomessa käytetään arvoa 0,85. (SFS-EN 1992 2015)

Betoniteräksen vetolujuuden mitoitusarvo lasketaan kaavalla

$$f_{yd} = f_{yk} / \gamma_s. \quad (4)$$

2.2 Mitoitus taivutukselle

2.2.1 Yleistä taivutusmitoituksesta

Ennen kuin teräsbetonilaatalle mitoitetaan rauditusmäärä, täytyy määrittää käytettävien materiaalien ominaisuudet, laattaan kohdistuvat kuormat ja maksimitaivutusrasitukset. Sen lisäksi laatalle määritetään käyttöikä, jonka perusteella valitaan rakenteelle riittävä suojabetonipeite. (Rakennustuoteteollisuus RTT ry 2011, s. 2)

Suunnittelija valitsee tai laskee laatalle paksuuden. Laatan paksuus valitaan usein sellaiseksi, että leikkausraudoitusta ei rakenteessa tarvita. Laatan paksuuden valitsemiseen vaikuttaa muun muassa taloudellisuus, palonkestävyys ja ilmaääneneristävyys (Rakennusmestarien Keskusliitto 1982, s. 515). Laatan ääneneristävyyksivaatimukset täyttyvät, jos laatan paksuus on yli 260 millimetriä. Huoneistojen sisäiset laatat voivat olla ohuempia (Nykyri 2015, s. 11).

Pääraudoituksen määrittämisessä käytetään laatan poikkileikkauksen tehollista korkeutta. Laatan tehollinen korkeus lasketaan kaavalla

$$d = h_L - c - \varnothing_{raud}/2, \quad (5)$$

On kuitenkin huomioitava, että ristiin kantavissa laatoissa laatan tehollinen korkeus on pienempi heikommassa suunnassa, koska rauditukset ovat laatasta päällekkäin (Rakennusmestarien keskusliitto 1982, s. 539).

2.2.2 Pääraudoituksen määrittäminen

Laatan tehollisen korkeuden ja mitoitusmomenttien määrittämisen jälkeen mitoitetaan laatalle tarvittava taivutus- eli pääraudoitus alla olevilla kaavoilla. Tässä kandidaatin-työssä ei käsitellä korkealujuusbetoneita, joten seuraavat kaavat pätevät ainoastaan, jos betonin lujuusluokka on enintään C50/60.

Suhteellinen momentti μ määritetään kaavalla

$$\mu = \frac{m_d}{bd^2 f_{cd}}, \quad (6)$$

Laatassa mitoitus taivutukselle tapahtuu suorakaidepoikkileikkauksena, jossa leveytenä käytetään $b = 1000$ mm. (Rakennustuoteteollisuus RTT ry 2011, s. 3) Jotta laattaan ei tarvita puristusraudoitusta, seuraavan ehdon on toteuduttava

$$\mu \leq \mu_b. \quad (7)$$

Tasapainoraidoitettun poikkileikkauksen suhteellinen momentti μ_b riippuu käytettävän betoniteräksen vetolujuudesta. (Rakennustuoteteollisuus RTT ry 2011, s. 3). Taulukossa 3 on esitetty tasapainoraidoitettun poikkileikkauksen suhteelliset momentit. Jos kaavan 8 ehto ei toteudu, laatan korkeutta on syytä kasvattaa.

Taulukko 3. Tasapainoraidoitettun poikkileikkauksen suhteelliset momentit (Kerokoski 2017, s. 64).

Teräs	Suhteellinen momentti μ_b
$f_{yk} = 400$ MPa	0,380
$f_{yk} = 500$ MPa	0,358
$f_{yk} = 600$ MPa	0,338

Puristuspinnan suhteellinen korkeus β ratkaistaan kaavalla

$$\beta = 1 - \sqrt{1 - 2\mu}. \quad (8)$$

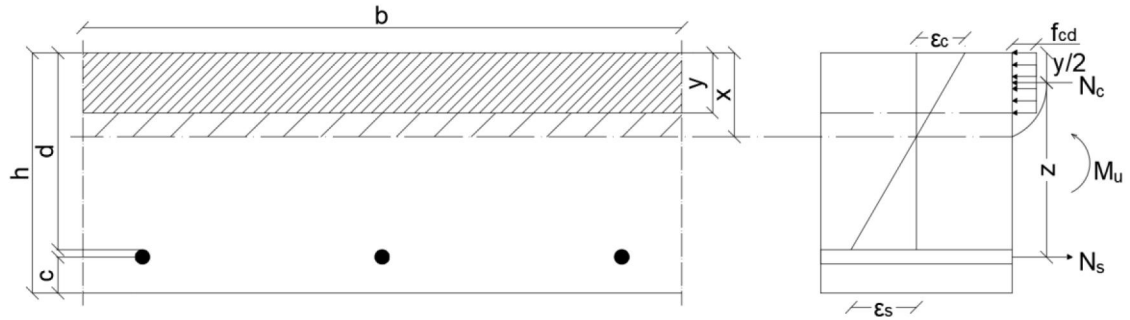
Poikkileikkauksen sisäinen momenttivarsi z ratkaistaan kaavalla

$$z = d(1 - \beta/2). \quad (9)$$

Sisäisen momenttivarren määrittämisen jälkeen ratkaistaan poikkileikkaukseen vaadittava raudoitusmäärä A_s :

$$A_s = \frac{m_d}{z \cdot f_{yd}}. \quad (10)$$

Kuvassa 1 on esitetty teräsbetonilaatan suorakaidepoikkileikkaus ilman puristusteräksiä. Kuva 1 on tehty Rakentajain kalenteri 1983 (s. 459) pohjalta. Kuvasta 1 nähdään esimerkiksi laatan tehollinen korkeus d ja poikkileikkauksen sisäinen momenttivarsi z .



Kuva 1. Teräsbetoni-laatan suorakaidepoikkileikkaus ilman puristusteräksiä (Rakennusmestarien keskusliitto 1982, s. 459).

Vaadittavan teräsmäärän määrittämisen jälkeen valitaan halkaisijaltaan riittävän kokoinen terästanko ja tankojen jakoväli. Terästankojen halkaisijan tulee olla vähintään 8 mm. (Rakennusmestarien keskusliitto 1982, s. 521). Säteeltään pieniä teräksiä yritetään välttää rakentamisessa, koska ne taipuvat helposti työmaalla niiden päälle astuttaessa. Raudoituksen jakoväli k yhdelle metrille lasketaan kaavalla (Suomen betoniyhdistys 1995, s. 133)

$$k = \frac{1000 \cdot A_{s1}}{A_s}. \quad (11)$$

Pääraudoituksen jakoväli saa olla enintään kolme kertaa laatan paksuus, mutta korkeintaan 400 mm. Maksimimomenttien ja pistekuormien kohdalla jakoväli saa olla enintään kaksi kertaa laatan paksuus, mutta korkeintaan 250 mm. Sen lisäksi laattojen jakoväli pyöristetään alaspäin 10 mm tarkkuuteen (Nykyri 2015, s. 80).

2.2.3 Vähimmäispääraudoitus

Pääraudoituksen määrittämiseen jälkeen määritetään teräsbetoni-laattojen vähimmäispääraudoitus. Laattojen vähimmäispääraudoitus $A_{s,min}$ lasketaan kaavalla

$$A_{s,min} = \max \left\{ \begin{array}{l} 0,26 \cdot \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} \cdot bd \\ 0,0013bd \end{array} \right., \quad (12)$$

Jos vähimmäispääraudoitus on suurempi kuin taivutusraudoitus, vähimmäispääraudoitus on määrävämpi ja se valitaan laatan raudoitukseksi. (Nykyri 2015, s. 80) Tämä tilanne voi syntyä esimerkiksi silloin, kuin laatasta ei esiinny suuria kuormituksia tai taivutusmomentteja, mutta laatan paksuus on silti suuri.

3. KAISTAMENETELMÄ JA PALKKIKAISTAT

Ristiin kantavissa laatoissa kuormitusten jakautumiseen on käytössä useita eri menetelmiä. Kuormitukset jakautuvat laatalle jännevälillä ja tuentatapojen mukaan ja jakautumisen selvittäminen on vaikea tehtävä. Tässä kandidaatintyössä määritykseen käytetään kaistamenetelmää.

3.1 Ristiin kantavat laatat

Ristiin kantaviksi laatoiksi kutsutaan laattoja, jotka ovat kahdessa toisiaan kohtisuorassa suunnassa taivutettuja ja ovat tuettuja useammalta kuin kahdelta reunalta. Ristiin kantavat laatat ovat tavallisesti suorakaiteen muotoisia, missä laatan pidemmän sivun suhde lyhyempään sivuun on enintään 2.

Laskelmissa ristiin kantavat laatat ajatellaan tukeutuvan reunoiltaan joko vapaasti tai jäykästi. Jäykkä tuenta aiheuttaa taivutusmomenttia reunoille. Tuenta ajatellaan jäykäksi, jos laatta liittyy kiinteästi esimerkiksi betoniseiniin. Toisaalta laatan reuna voidaan ajatella vapaasti tuetuksi eikä seinän jäykistävää vaikutusta tarvitse ottaa huomioon, jos rakenteelta ei vaadita tiiviyttä eikä esimerkiksi vedenpitävyyttä. (Rakennusmestarien keskusliitto 1982, s. 538) Vaikka vapaasti tuetussa laatussa reuna-alueelle ei muodostu taivutusmomenttia, pitää puolet laskennallisesta kenttäraudoituksesta tuoda tuelle yläpinnan raudoitukseksi ja ankkuroidaan sinne (SFS EN-1992 2015, S. 156).

3.2 Kaistamenetelmän periaate

Kaistamenetelmä on tapa, jolla voidaan selvittää kuormitusten jakautuminen laatussa. Kaistamenetelmä on plastisuusteorian alarajalauseen mukainen mikä tarkoittaa, että momenttijakauma toteuttaa tasapainoehdot ja laatan reunaehdot. (Nykyri 2015, s. 23)

Kaistamenetelmässä laatta jaetaan laattakaistoihin ja laattaan vaikuttava kokonaiskuorma jaetaan laattakaistoille suhteessa. Jako tehdään jännevälillä ja tuentatavan mukaan. Kuormituksen jako laattakaistoille vaikuttaa merkittävästi siihen, miten suuret taivutusmomentit laatan eri osiin syntyvät ja kuinka suuri rauditusmäärä eri laattakaistoihin tarvitaan. Laatan pääraudoitusmäärä on sitä pienempi, mitä lähemmäksi momenttijakauma saadaan lineaarisen kimmoteorian mukaista jakaumaa. (Nykyri 2015, s. 23)

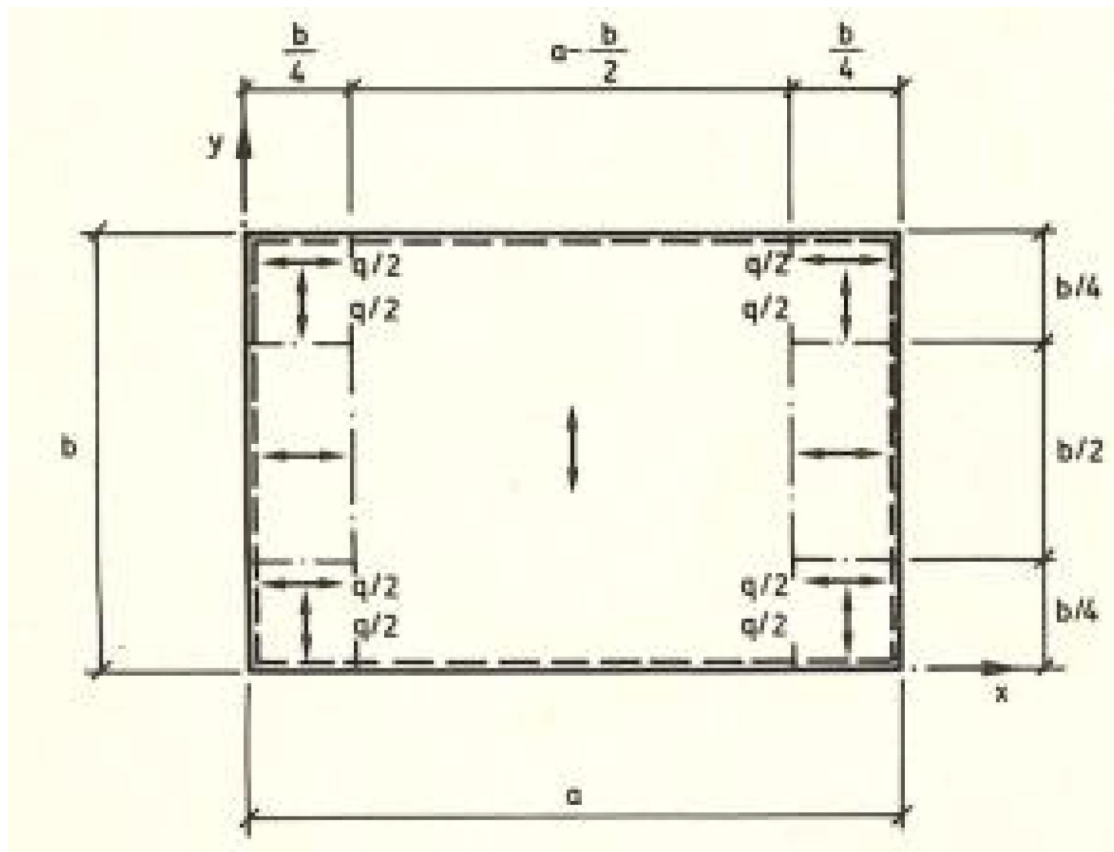
Tässä kandidaatintyössä esitetään kaistojen ja kuormien valinta kolmessa tapauksessa: neljältä reunalta vapaasti tuettu laatta, kahdelta reunalta jäykästi tuettu laatta sekä laatta, jossa on palkkikaistoja. Palkkikaistoja käytetään laatoissa, joissa on vapaita reunoja tai suuria aukkoja. Nämä muuta laattaa voimakkaammin raudoitettut palkkikaistat toimivat

laattakaistojen tukena ja kuormat siirtyvät niille laattakaistoilta (Nykyri 2015, s. 28). Tämän vuoksi palkkikaistojen käyttö vaatii sitä, että suunnittelija osaa tehdä kaistojen ja kuormien valinnan laatan eri tuentatapauksissa. Alaluvussa 3.3 käsitellään neljältä reunalta vapaasti tuettu laatta ja kahdelta reunalta jäykästi tuettu laatta ja alaluvussa 3.4 tutkitaan palkkikaistojen käyttöä.

3.3 Laatan jako laattakaistoihin

3.3.1 Neljältä reunalta vapaasti tuettu laatta

Kuvassa 2 on esitetty voimasuureiden jakautuminen suorakaidelaatassa, joka on neljältä reunalta vapaasti tuettu. Neljältä reunalta tuettu laatta jaetaan seitsemään laattakaistaan.

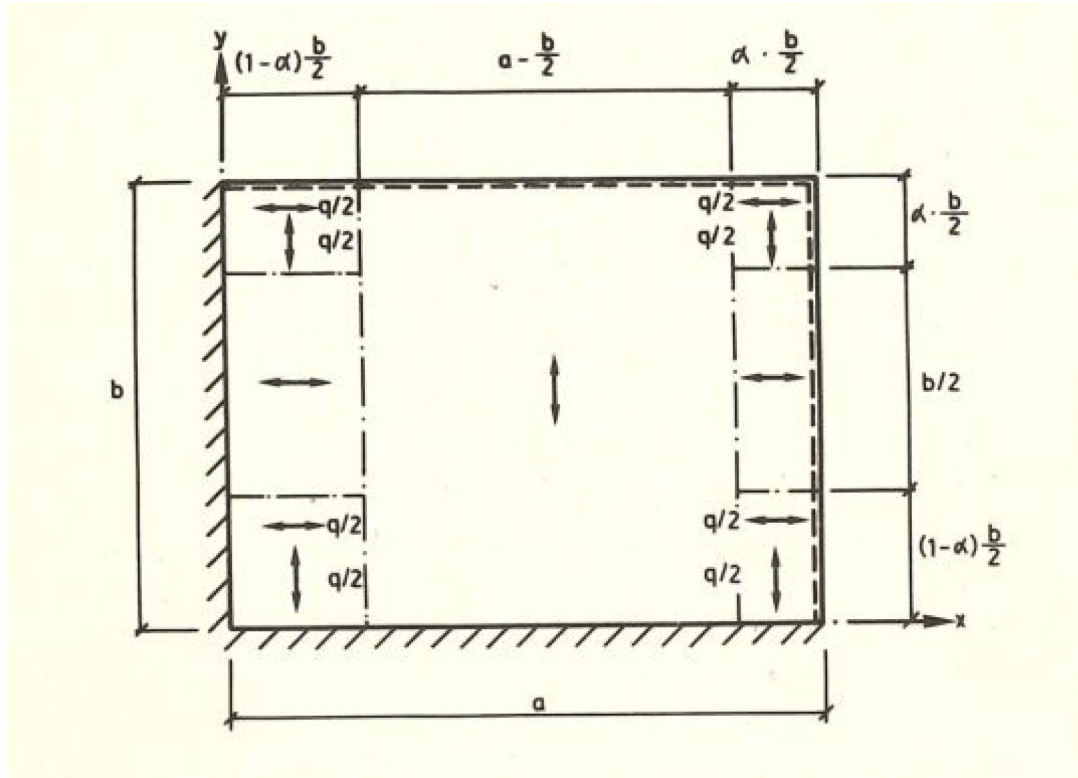


Kuva 2 Kuormien jakautuminen suorakaidelaatassa, joka on neljältä reunalta vapaasti tuettu (Hillerborg 1974, s. 45).

Laatan keskiosassa on yksi iso keskikaista, joka kuljettaa laatalle tulevat kuormitukset laatan pidemmän sivun tuille. Laatan lyhyt reuna jaetaan kolmeen reunakaistaan, joiden leveydet määritetään laatan lyhyemmän sivumitan mukaan. Laatan nurkissa olevat reunakaistat kuljettavat puolet kuormituksesta pidemmälle sivulle ja puolet lyhyemmälle sivulle.

3.3.2 Kahdelta reunalta jäykästi tuettu laatta

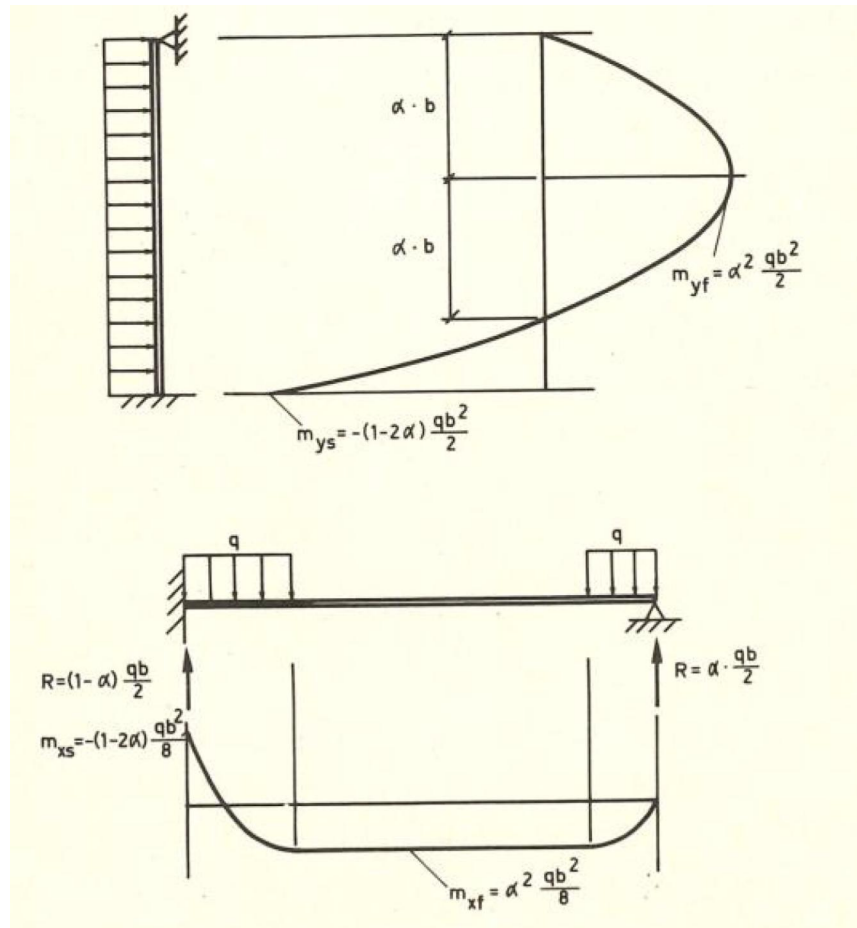
Kuvassa 3 on esitetty voimasuureiden jakautuminen suorakaidelaatassa, joka on kahdelta reunalta jäykästi tuettu ja kahdelta reunalta vapaasti tuettu. Laatan jako laattakaistoihin tehdään samalla periaatteella kuin kuvan 2 tapauksessa, mutta reunakaistojen leveydet määritetään eri tavalla.



Kuva 3. Kuormien jakautuminen suorakaidelaatassa, joka on kahdelta reunalta jäykästi tuettu (Hillerborg 1974, s. 59).

Laatan jäykät tuet keräävät enemmän kuormaa kuin vapaat tuet, joten jäykkien tukien vieressä olevien laattakaistojen leveyttä kasvatetaan (Nykyri 2015, s. 26). Muuten kuormituksen jakautuminen laatan tuille tehdään samalla tavalla kuvassa 3 kuin kuvassa 2.

Kuvassa 4 on esitetty kuvan 3 leikkauskuvat lyhyeltä ja pitkältä sivulta. Kuvassa 4 näkyvät leikkauksen kohtaan vaikuttavat kuormitukset ja tuki- ja kenttämomenttien laskemiseen tarvittavat kaavat.



Kuva 4. Kuvan 3 tapauksen taivutusmomenttikuviot (Hillerborg 1974, s. 59).

Kuvasta 4 havaitaan, että taivutusmomentin maksimikohtia esiintyy sekä laatan reunoilla ja laatan keskiosassa. Jos kuormituskaaviossa momentti on positiivista, vetoa syntyy laatan alapintaan, joten pääraudoitus tarvitaan laatan alapintaan. Negatiivinen momentti tarkoittaa, että pääraudoitus tarvitaan laatan yläpintaan. Kuvan 4 tapauksessa momenttikuvion negatiivisella puolella ovat tukimomentit m_{xs} ja m_{ys} .

Kuvassa 3 ja 4 esiintyvä parametri α määrittää laatan reunoilla olevien laattakaistojen leveyden nurkka-alueilla sekä tuki- ja kenttämomenttien arvon. Parametri α ratkaistaan kaavalla

$$\alpha = \frac{1}{R_m} \cdot (-1 + \sqrt{1 + R_m}), \quad (13)$$

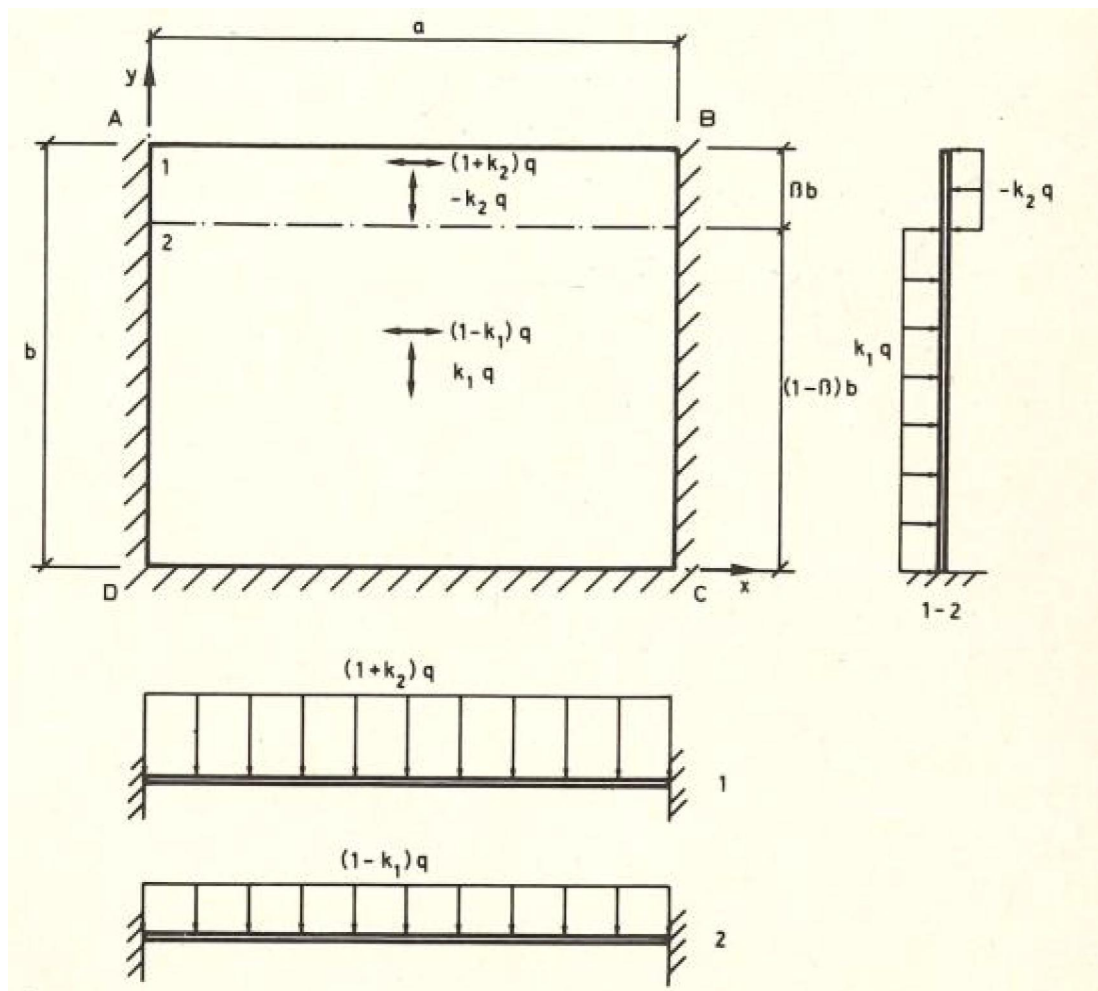
missä R_m kuvaa y-suuntaisen laattakaistan tuki- ja kenttämomentin suhdetta m_{ys}/m_{yf} (Nykyri 2015, s. 26). Kaistamenetelmä perustuu siihen, että suunnittelija arvioi tuki- ja kenttämomenttien suhteen. (Nykyri 2015, s. 26)

3.4 Palkkikaistat

3.4.1 Palkkikaistat vapaareunallisessa laaatassa

Vapaa reuna voi sijaita laaatassa joko pidemmän sivun tai lyhyemmän sivun päässä. Tällöin laatta on kolmelta reunalta tuettu. Koska yhdeltä laatan sivulta puuttuu tuki, sinne täytyy muodostaa voimakkaammin raudoitettu palkkikaista, joka siirtää vapaalle reunalle tulevat kuormitukset palkkikaistojen päässä oleville tuille.

Kuvassa 5 on esitetty voimasuureiden jakautuminen laaatassa, jossa vapaa reuna sijaitsee laatan pidemmällä sivulla. Kuvasta 5 havaitaan, että laatan kokonaiskuorma jakaantuu x- ja y-suunnassa sen mukaan, mikä luvun k_1 arvo on. Luku k_1 valitaan siten, että laaatassa voidaan käyttää minimiraudoitusta (Hillerborg 1974, s. 70).



Kuva 5. Kuormien jakautuminen laaatassa, jossa vapaa reuna sijaitsee laatan pidemmällä sivulla (Hillerborg 1974, s. 69).

Luku k_2 vaikuttaa kuormien jakautumiseen palkkikaistassa. Luku k_2 ratkaistaan kaavalla

$$k_2 = \frac{k_1(1-\beta)^2 + (2m_{ys}/qb^2)}{\beta \cdot (2-\beta)}, \quad (14)$$

missä m_{ys} on kuvassa 5 lyhyemmän suunnan tukimomentti, β palkkikaistan leveyteen vaikuttava kerroin, b laatan lyhyempi sivumitta ja q laattaan vaikuttava kokonaiskuorma (Hillerborg 1974, s. 69).

Kuvan 5 leikkaus 1-2 toimii siten, että osa laatan kuormituksesta siirtyy pidemmän sivun jäykälle tuelle ja osa palkkikaistalle. Vapaana ulokkeena toimivan rakenteen tukimomentti lasketaan seuraavalla kaavalla (Rakennusmestarien Keskusliitto 1982, s. 48)

$$m_s = -qL^2/2. \quad (15)$$

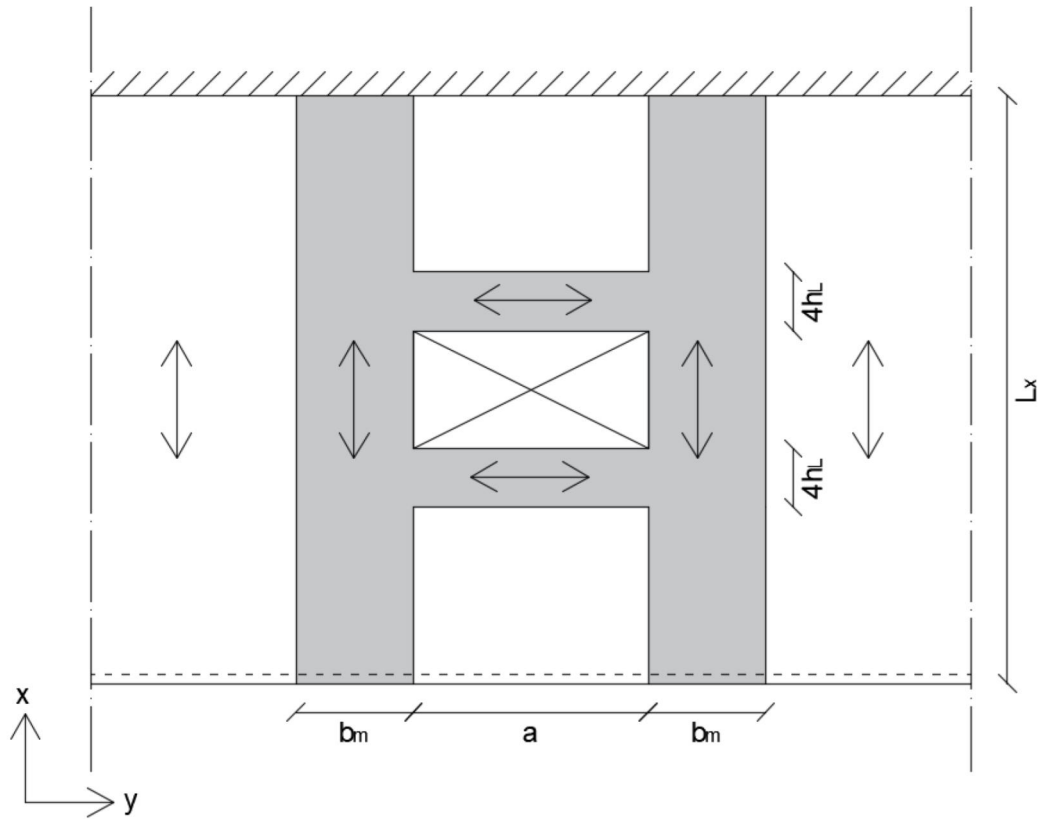
Leikkaus 1-2 ei ole täysin vapaana ulokkeena toimiva rakenne, koska sen päässä on palkkikaista. Tämän vuoksi oletetaan, että vapaan ulokkeen päässä oleva palkkikaista puolittaa jäykän tuen momentin arvon (Kerokoski 2017, s. 155). Tällöin kaava 15 muuttuu muotoon

$$m_{ys} = -\frac{1}{2} \cdot qL^2/2. \quad (16)$$

Kaavassa 14 ja kuvassa 5 esiintyvä luku β riippuu palkkikaistan leveydestä, jonka suunnittelija valitsee. Palkkikaistan leveyden tulee olla sellainen, että se pystyy kannattelemaan laattakaistoilta tulevan kuorman ja siirtämään kuorman laatan tuille. Sen lisäksi rauditusmäärä ei saa kasvaa liian suureksi, joten palkkikaista ei voi olla myöskään liian kapea (Nykyri 2015, s. 28).

3.4.2 Palkkikaistat aukollisessa laatussa

Kaistamenetelmää palkkikaistojen kanssa voidaan käyttää kuormitusten jakautumisen selvittämiseen myös silloin, jos laatussa on suuria aukkoja. Tällöin laatta jaetaan laatta- ja palkkikaistoihin aukon lähettyviltä kuvan 6 mukaisesti. Kuvassa tummalla värillä esitetyt kaistat ovat palkkikaistoja ja valkoisella värillä laattakaistoja.



Kuva 6. Laatan jako laatta- ja palkkikaistoihin ison aukon ympärillä (Rakennusmestarien Keskusliitto 1998, s. 291).

Laatassa olevaa aukkoa pidetään suurena, jos suorakaiteen muotoisen aukon pidempi sivumitta on enintään viidesosa laatan lyhyemmästä sivumitasta. Toisin sanoen kuvan 6 mukaan

$$a \geq \frac{L_x}{5}. \quad (17)$$

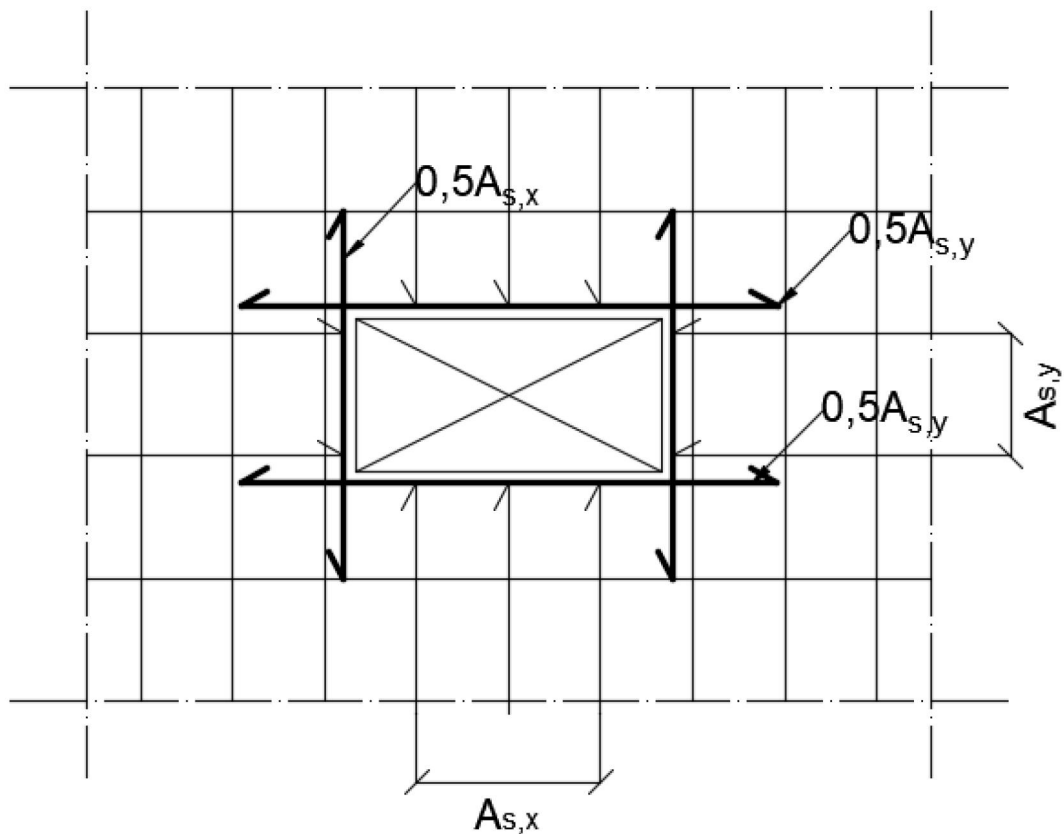
Palkkikaistan leveys määräytyy laatan paksuuden ja lyhyemmän sivumitan mukaan. Palkkikaistan leveydeksi b_m voidaan valita

$$4 \cdot h_L \leq b_m \leq 0,25 \cdot L_x, \quad (18)$$

missä h_L on laatan paksuus ja L_x laatan lyhyempi sivumitta (Rakennusmestarien Keskusliitto 1998, s. 291). Aukon ympärille muodostuu palkkikaistoja sekä x- että y-suunnassa. Y-suuntaisten palkkikaistojen leveydeksi valitaan neljä kertaa laatan paksuus kuvan 5 mukaan ja nämä y-suuntaiset palkkikaistat siirtävät kuormitukset x-suuntaisille palkkikaistoille. X-suuntaisten palkkikaistojen leveys on b_m , ja ne siirtävät vastaavasti kuormitukset laatan reunatuille. Tämän vuoksi x-suuntaiset palkkikaistat saattavat olla leveämpiä, koska ne vastaanottavat kuormituksia sekä laatta- että palkkikaistoilta.

Kuvassa 6 on esitetty ainoastaan kuormien jakautuminen aukon läheisyydessä. Ristiin kantavan laatan kuorma- ja kaistajako laatan reuna-alueilla on esitetty aikaisemmin kuvissa 2 ja 3.

Jos suorakaiteen muotoisen aukon pidempi sivumitta on pienempi kuin laatan lyhyempi sivumitta, voidaan reiän johdosta katkeavaa raudoitusta vastaava teräsmäärä kummassakin laatan suunnassa sijoittaa aukon pieliin. Tämän toteutus on esitetty kuvassa 7. Sen lisäksi on vältettävä aukkojen sijoittamista laatan rasitettuihin kohtiin (Rakennusmestarien Keskusliitto 1998, s. 290-291).



Kuva 7. Pienen reiän lisäraudoitus (Rakennusmestarien Keskusliitto 1998, s. 290).

4. PALKKIKAISTOJEN KÄYTTÖ MITOITUKSESSA

Tässä luvussa mitoitetaan kahdelle teräsbetonilaatalle pääraudoitus. Ensimmäiseksi mitoitetaan vapaareunallinen teräsbetonilaatta ja toiseksi porraskolkollinen teräsbetonilaatta.

4.1 Vapaa reuna teräsbetonilaatassa

4.1.1 Vapaareunallisen laatan lähtötiedot ja paksuuden valinta

Mitoitetaan teräsbetonilaatta, jossa vapaa reuna sijaitsee laatan pidemmällä sivulla. Laatan pidempi sivumitta on 5,0 metriä ja lyhyempi 3,0 metriä. Laatta on kolmelta muulta sivulta jäykästi tuettu. Laatatassa käytetään betonia C25/30 ja betoniterästä B500B.

Valitaan laatan paksuudeksi $h_L = 200$ mm. Koska kyseessä on ristiin kantava laatta, laatalle lasketaan kaksi tehollista korkeutta. Vahvemman suunnan tehollista korkeutta merkitään d_1 ja heikomman suunnan tehollista korkeutta d_2 . Arvioidaan käytettävän terästan-
gon halkaisijaksi molemmissa suunnissa 10 mm.

Lasketaan alustavaksi tehollisiksi korkeuksiksi kaavalla 6

$$d_1 = 200 \text{ mm} - 30 \text{ mm} - 10 \text{ mm}/2 = 165 \text{ mm}$$

$$d_2 = 200 \text{ mm} - 30 \text{ mm} - 10 \text{ mm} - 10 \text{ mm}/2 = 155 \text{ mm}.$$

4.1.2 Vapaareunallisen laatan kuormitukset

Seuraavaksi määritetään laattaan vaikuttavan kuorman mitoitusarvo murtorajatilassa. Laattaan vaikuttaa oman painon lisäksi hyötykuorma $q_{k,hyöty} = 5 \text{ kN/m}^2$. Esimerkiksi autotallien ja ajoneuvojen liikennöintialueiden hyötykuormana käytetään tätä arvoa (SFS EN-1991-1-1 2011, s. 40).

Lasketaan kokonaiskuorman mitoitusarvo normaalisti vallitsevassa ja tilapäisessä mitoitustilanteessa kaavalla 2:

$$q_d = \max \left\{ \begin{array}{l} 1,35 \cdot 25 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \cdot 0,2 \text{ m} = 6,75 \text{ kN/m}^2 \\ 1,15 \cdot 25 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \cdot 0,2 \text{ m} + 1,5 \cdot 5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 13,3 \text{ kN/m}^2 \end{array} \right. = 13,3 \text{ kN/m}^2$$

Kuormituksen jakautuminen vapaareunallisessa laatasta on esitetty kuvassa 7. Valitaan $k_1 = 0,4$, jolloin lyhyemmälle sivulle viedään kuormitusta $p_{d,x} = 5,30 \text{ kN/m}^2$ verran ja pidemmälle sivulle $p_{d,y} = 7,95 \text{ kN/m}^2$. Sen lisäksi mitoitetaan laatta siten, että palkkikaistan leveys on 600 mm eli $\beta = 0,2$.

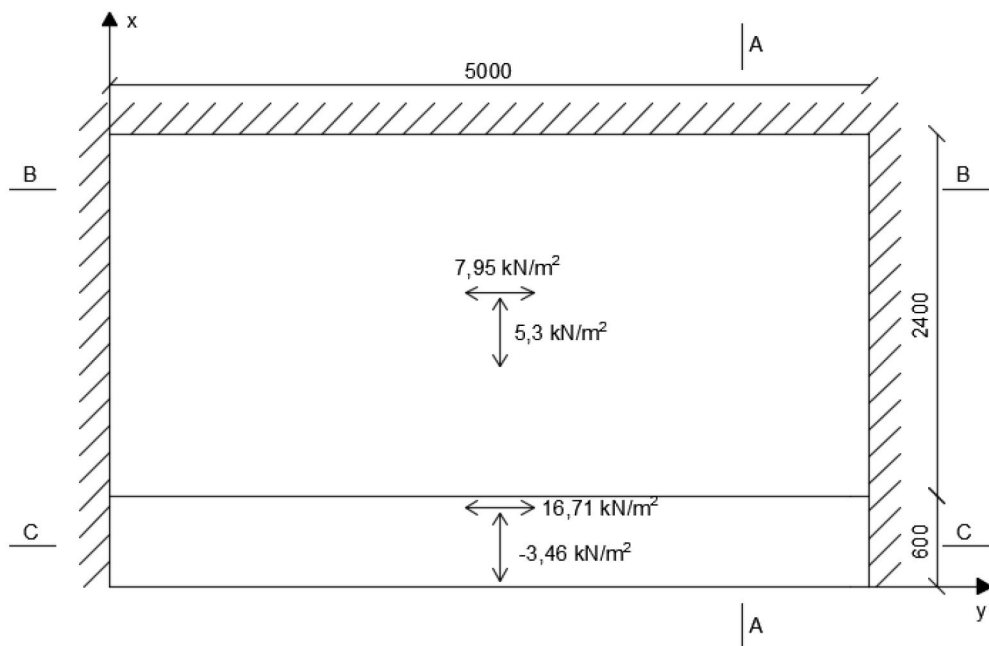
Lasketaan laatan lyhyemmän sivun momentti jäykällä tuella. Oletetaan, että vapaan ulokkeen päässä oleva palkkikaista puolittaa jäykän tuen momentin arvon (Kerokoski 2017, s. 155). Näin jäykän tuen momentin arvoksi saadaan kaavalla 16

$$m_{xs,A} = -\frac{1}{2} \cdot \frac{5,30 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} (2,7 \text{ m})^2}{2} = -9,66 \frac{\text{kNm}}{\text{m}}.$$

Kaavalla 14 voidaan määrittää k_2 , jotta saadaan selville kuormituksen jakautuminen palkkikaistassa.

$$k_2 = \frac{0,4 \cdot (1-0,2)^2 + 2 \cdot \frac{-9,66 \text{ kNm/m}}{13,3 \text{ kN/m}^2 \cdot (3 \text{ m})^2}}{0,2 \cdot (2-0,2)} \approx 0,261.$$

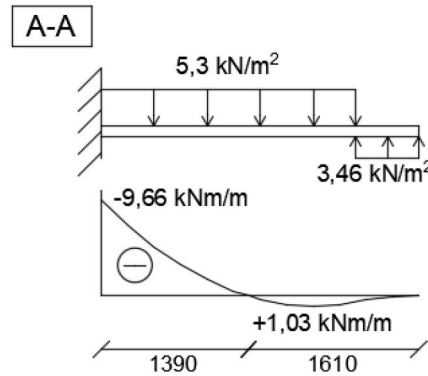
Kuormituksen jakautuminen laatasta ja palkkikaistan leveys on esitetty kuvassa 8. Kuvan mitat ovat millimetreinä.



Kuva 8. Vapaareunallisen laatan mitat ja kuormien jakautuminen.

4.1.3 Vapaareunallisen laatan maksimitaivutusmomentit

Kuvassa 9 on esitetty leikkaus A-A eli laatan x-suuntainen leikkaus, jonka sijainnin näkee kuvasta 8.



Kuva 9. Leikkauksen A-A taivutusmomenttikuvio.

Leikkauksen A-A eli vapaan ulokkeen tukimomentti laskettiin aikaisemmin kappaleessa 4.1.2, jonka arvoksi saatiin $-9,66 \text{ kNm/m}$. Vapaan ulokkeen kenttämomentti saadaan statiikan keinoin ratkaistua. Leikkauksen A-A:n maksimikenttämomentti sijaitsee siinä kohdassa, missä leikkausvoima on nolla.

$$3,46 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot 0,6 \text{ m} - 5,30 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot (x - 0,6 \text{ m}) = 0 \rightarrow x = 0,99 \text{ m}$$

Leikkauksen A-A kenttämomentti sijaitsee $0,99$ metrin etäisyydellä vapaasta reunasta. Kenttämomentin arvoksi saadaan

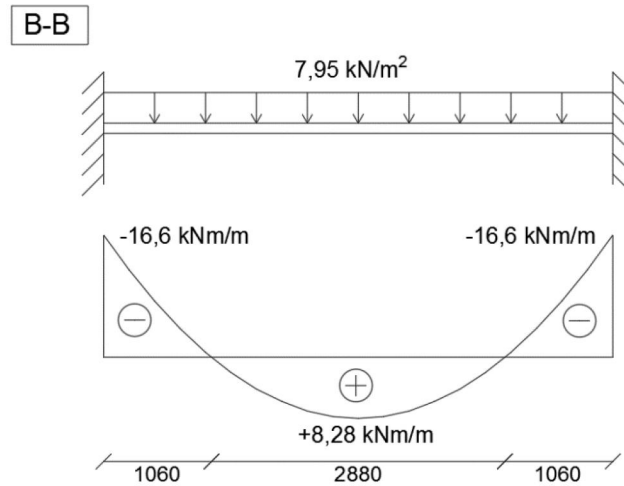
$$m_{f,A} = 3,46 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot 0,6 \text{ m} \cdot 0,69 \text{ m} - 5,30 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot 0,39 \text{ m} \cdot \frac{0,39 \text{ m}}{2} = 1,03 \frac{\text{kNm}}{\text{m}}.$$

Momenttikuvion nollakohdan sijainnit tulee myös laskea, jotta tiedetään, milloin raudotus sijaitsee laatan yläpinnassa ja milloin alapinnassa. Leikkauksen A-A:n momentin nollakohta sijaitsee jäykästä tuesta etäisyydellä

$$3,46 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot 0,6 \text{ m} \cdot (x_2 - 0,3 \text{ m}) - 5,30 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot (x_2 - 0,6 \text{ m}) \cdot \frac{(x_2 - 0,6 \text{ m})}{2} = 0$$

$$\rightarrow x_2 = 1,61 \text{ m}$$

Kuvassa 10 on esitetty leikkaus B-B eli laatan y-suuntainen leikkaus. Laatta on y-suunnassa molemmista päistä jäykästi tuettu.



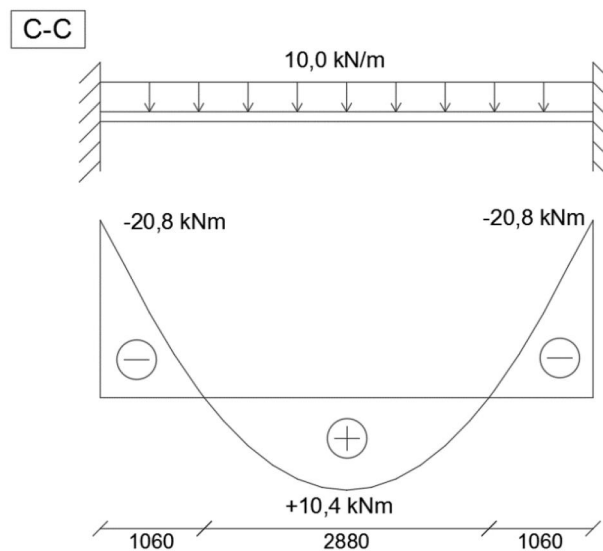
Kuva 10. Leikkauksen B-B taivutusmomenttikuvio.

Molemmista päistä tuetun laatan tuki- ja kenttämomentin maksimiavot lasketaan kaavoilla 19 ja 20 (Rakennusmestarien Keskusliitto 1982, s. 52). Kenttämomentin maksimiavro sijaitsee jännevälän puolivälissä.

$$m_{s,B} = \frac{-q_d L^2}{12} = \frac{7,95 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot (5 \text{ m})^2}{12} = -16,6 \text{ kNm/m} \quad (19)$$

$$m_{f,B} = \frac{-q_d L^2}{24} = \frac{7,95 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot (5 \text{ m})^2}{24} = 8,28 \text{ kNm/m} \quad (20)$$

Kuvassa 11 on esitetty palkkikaistaan vaikuttava kuorma. Palkkikaistan mitoitus varten muutetaan palkkikaistaan vaikuttava neliökuorma viivakuormaksi kertomalla neliökuorma palkkikaistan leveydellä eli 0,6 metrillä.



Kuva 11. Leikkauksen C-C taivutusmomenttikuvio.

Palkkikaistan tuki- ja kenttämomentti lasketaan samoilla kaavoilla kuin leikkauksen B-B momentit. Palkkikaistan tukimomentiksi saadaan $m_{s,c} = -20,8 \text{ kN/m}$ ja kenttämomentiksi $m_{f,c} = 10,4 \text{ kN/m}$. Momenttikuvion nollakohdat sijaitsevat myös samoissa kohdissa kuin leikkauksessa B-B.

4.1.4 Vapaareunallisen laatan pääraudoitus

Seuraavaksi lasketaan betonin puristuslujuudelle ja betoniteräksen myötölujuudelle mitoitusarvot, joita tarvitaan taivutusraudoituksen määrittämisessä. Materiaalien osavarmuusluvut saadaan taulukosta 2. Kyseessä on tilapäinen mitoitus tilanne, joten betonin puristuslujuus murtorajatilassa kaavalla 3 on $f_{cd} = 14 \text{ MPa}$ ja teräksen myötölujuus kaavalla 4 on $f_{yd} = 435 \text{ MPa}$. Betonin C25/30 keskimääräinen vetolujuus saadaan taulukosta 1, joka on $f_{ctm} = 2,6 \text{ MPa}$.

Laatan pääraudoitus lasketaan kaavoilla 6–12. Maksimimomenteja on yhteensä kuusi kappaletta, joten taivutusraudoitus määritetään kuusi kertaa.

Taulukkoon 4 on koottu kaavojen 6–12 tulokset. Tämän jälkeen taulukossa on esitetty, mikä terästanko raudoitukseen valitaan, millä jakovälillä teräkset asennetaan ja mihin teräs sijoitetaan laattassa. Taulukkoon on merkitty myös vaadittu teräsmäärä harmaalla värillä.

Taulukko 4. Laattaan vaadittavat raudoitusmäärät.

Leikkaus	m_d [kNm/m]	d [mm]	b [mm]	μ	β	z [mm]	A_s [mm ² /m]	$A_{s,min}$ [mm ² /m]	Teräs + k/k	Teräksen sijainti
A-A	9,66	165	1000	0,025	0,026	163	136	223	T8 k210	yläpintaan
	1,03	165	1000	0,003	0,003	165	14	223	T8 k220	alapintaan
B-B	16,6	155	1000	0,049	0,051	151	253	210	T8 k190	yläpintaan
	8,28	155	1000	0,025	0,025	153	124	210	T8 k230	alapintaan
C-C	20,8	165	500	0,109	0,116	155	308	112	3T12	yläpintaan
	10,4	165	500	0,055	0,056	160	149	112	3T8	alapintaan

Taulukon 4 tuloksista havaitaan, että palkkikaista vaatii noin 1,2-kertaisen raudoitusmäärän laattakaistaan B-B verrattuna. Palkkikaistan raudoitusmäärä ei ollut laattakaistojen raudoitusmäärää paljoa suurempi, joka johtui pääosin laatan lyhyistä jänneväleistä. Koska

kaavoissa 18 ja 19 laatan jänneväli korotetaan toiseen potenssiin, on jännevälillä suuri merkitys siihen, kuinka suuri taivutusmomentti laattaan lopulta syntyy.

4.2 Porrasaukko teräsbetonilaatassa

4.2.1 Porrasaukollisen laatan lähtötiedot ja paksuuden valinta

Tässä kappaleessa mitoitetaan aukollinen teräsbetonilaatta, jonka lyhyempi sivumitta on 6 metriä ja pidempi sivumitta 8 metriä. Aukko sijaitsee teräsbetonilaatan keskellä, jonka lyhyempi sivumitta on 1,2 metriä ja pidempi 1,8 metriä. Laatta on kahdelta sivulta jäykästi tuettu ja kahdelta sivulta vapaasti tuettu. Betonin lujuusluokkana käytetään C25/30 ja betoniteräkseksi valitaan B500B.

Jännevälit ovat suuremmat kuin kohdan 4.1 mitoitustapauksessa ja laatta toimii asuntojen välisenä välipohjalaattana, joten valitaan laatan alustavaksi paksuudeksi $h_L = 250$ mm. Valitaan betonipeitteen arvoksi $c = 30$ mm ja arvioidaan terästankojen paksuudeksi 10 mm.

Laatan teholliseksi korkeudeksi saadaan kaavalla 5.

$$d_1 = 250 \text{ mm} - 30 \text{ mm} - 10 \text{ mm}/2 = 215 \text{ mm}$$

$$d_2 = 250 \text{ mm} - 30 \text{ mm} - 10 \text{ mm} - 10 \text{ mm}/2 = 205 \text{ mm}.$$

4.2.2 Porrasaukollisen laatan kuormitukset

Koska kyseessä on porrasaukollinen teräsbetonilaatta, oletetaan laatan toimivan rakennuksen välipohjana. Välipohjan hyötykuorman arvo on $2,0 \text{ kN/m}^2$ (SFS-EN 1991-1-1 2011, s. 30). Laatan oman painon lisäksi ei oteta huomioon muita pysyviä kuormia kuten kevyiden väliseinien painoa tai tasoitetta.

Laattaan vaikuttavan kokonaiskuorman mitoitus normaalisti vallitsevassa ja tilapäisessä mitoitustilanteessa saadaan kaavalla 2.

$$q_d = \max \left\{ \begin{array}{l} 1,35 \cdot 25 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \cdot 0,25 \text{ m} = 8,44 \text{ kN/m}^2 \\ 1,15 \cdot 25 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \cdot 0,25 \text{ m} + 1,5 \cdot 2,0 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 10,2 \text{ kN/m}^2 \end{array} \right. = 10,2 \text{ kN/m}^2$$

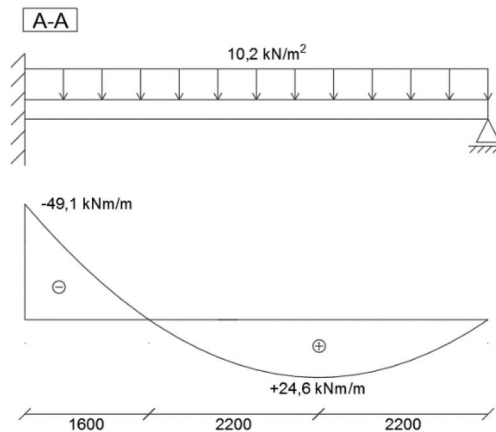
Seuraavaksi jaetaan laatta kaistoihin kuvien 3 ja 6 mukaan. Arvioidaan laatan lyhyemmässä suunnassa tuki- ja kenttämomenttien suhteeksi $R_m = 2$, jolloin parametrin α arvoksi saadaan kaavalla 13

$$m_{ys} = -(1 - 2\alpha) \cdot \frac{q \cdot L_x^2}{8} = -(1 - 2 \cdot 0,366) \cdot \frac{10,2 \frac{kN}{m^2} \cdot (6 m)^2}{8} = -12,3 kNm/m$$

4.2.3 Porrasaukollisen laatan maksimitaivutusmomentit

Määritetään maksimitaivutusmomentit eri laatta- ja palkkikaistoissa. Jokainen laatta- ja palkkikaista tulee käsitellä erikseen, koska niihin vaikuttaa erisuuruinen kuormitus ja kaistojen jännevälit vaihtelevat. Tässä kappaleessa lasketaan ainoastaan leikkauksen A-A maksimitaivutusmomentit ja muiden leikkauksien laskut esitetään liitteessä A.

Lasketaan leikkauksen A-A maksimitaivutusmomentit ja taivutusmomenttikuvion nollakohta. Leikkaus A-A ja sen taivutusmomenttikuvio on esitetty kuvassa 13.



Kuva 13. Leikkaus A-A ja sen taivutusmomenttikuvio.

Kohdassa 4.2.2 oletettiin, että leikkauksen A-A tukimomentti pysyy samana, olkoon laatasta aukkoa tai ei. Leikkauksen A-A tukimomentti on

$$m_{As} = m_{xs} = -49,2 kNm/m.$$

Leikkauksen A-A kenttämomentti lasketaan kuvan 4 kaavalla. Kenttämomentin arvo on puolet pienempi kuin tukimomentti, koska kohdassa 4.2.2 arvioitiin tuki- ja kenttämomentin suhteeksi 2.

$$m_{Af} = \alpha^2 \cdot \frac{q \cdot L_x^2}{2} = 0,366^2 \cdot \frac{10,2 kN/m^2 \cdot (6 m)^2}{2} = 24,59 kNm/m \approx 24,6 kNm/m.$$

Taivutusmomenttikuvion nollakohdan etäisyys jäykästä tuesta lasketaan kuvan 4 mukaan

$$x_A = L_x - 2 \cdot \alpha \cdot L_x = 6 m - 2 \cdot 0,366 \cdot 6 m = 1,608 m \approx 1,6 m.$$

Leikkauksessa B-B on yhdeltä sivulta vapaasti ja jäykästi tuettu rakenne, joiden välissä on porrassaukko. Jäykästi tuetun rakenteen ajatellaan toimivan vapaana ulokkeena, jolloin se ei siirrä kuormitusta lyhyemmälle palkkikaistalle, vaan jäykkä tuki ottaa vastaan kaiken kuormituksen. Vapaasti tuettu rakenne kuljettaa kuormituksensa tuelle ja lyhyemmälle palkkikaistalle. (Hillerborg 1974, s. 88-89)

Leikkauksissa C-C ja D-D laattakaistat siirtävät kuormitukset sekä laatan tuille että pidemmille palkkikaistoille. Leikkauksessa D-D laattaan vaikuttava kuormitus on puolet pienempi kuin leikkauksessa C-C, joten taivutusmomenttienkin suuruudet puolittuvat. (Hillerborg 1974, s. 88-89)

Leikkauksessa E-E kuormitukset jakaantuvat sekä jäykälle että vapaalle tuelle. Maksimitaivutusmomenttien laskukaavat tässä leikkauksessa on esitetty kuvassa 4.

Leikkauksissa F-F ja G-G on esitetty lyhyemmät palkkikaistat. Palkkikaistaan G-G vaikuttaa pysyvän ja muuttuvan kuorman lisäksi leikkaukselta B-B tuleva kuorma. Lyhyemmät palkkikaistat kuljettavat kuormitukset pidemmille palkkikaistoille. (Hillerborg 1974, s. 88-89)

Leikkauksissa H-H ja I-I on esitetty pidemmät palkkikaistat. Näihin vaikuttavat pysyvän ja muuttuvan kuorman lisäksi kuormat, jotka tulevat laattakaistoilta ja lyhyemmiltä palkkikaistoilta. (Hillerborg 1974, s. 88-89) Laskuissa oletetaan, että kiinnitetyn tuen momentti on yhtä suuri kuin kohdassa 4.2.2 laskettu tukimomentti $m_{xs} = -49,2 \text{ kNm/m}$.

Taulukossa 5 on esitetty laatta- ja palkkikaistojen maksimitaivutusmomentit. Maksimitaivutusmomenttien laskut ovat liitteessä A.

Taulukko 5. Lasketut taivutusmomentit eri laatta- ja palkkikaistoissa.

Leikkaus	Tukimomentti [kNm/m]	Kenttämomentti [kNm/m]	
A-A	-49,2	24,6	
B-B	-22,5	2,66	
C-C	-12,3	2,33	4,06
D-D	-6,15	1,17	2,03
E-E	-6,15	3,07	
F-F	0	4,89	
G-G	0	11,6	
H-H	-49,2	50,6	
I-I	-49,2	50,7	

4.2.4 Porrasaukollisen laatan pääraudoitus

Taulukkoon 6 on koottu kaavoilla 6–12 saadut tulokset. Laatassa käytetään lujusluokaltaan C25/30 betonia, joten betonin puristuslujuuden mitoitusarvo $f_{cd} = 14$ MPa ja keskimääräisen vetolujuuden ominaisarvo $f_{ctm} = 2,6$ MPa. Teräksen myötölujuuden mitoitusarvo on $f_{cd} = 435$ MPa.

Määrävä raudoitusmäärä on merkitty taulukkoon 6 harmaalla värillä. Sen lisäksi taulukossa esitetään, mikä terästanko kaistaan valitaan ja millä jakovälillä teräkset asennetaan laattaan tai kuinka monta kappaletta teräksiä asennetaan. Koska leikkauksen A-A leveys on 500 mm, terästankojen ilmoitetaan kappalemääränä, eikä jakovälinä.

Taulukko 6. Vaaditut raudoitusmäärät porrasaukollisessa laatussa.

Leikkaus	m_d [kNm/m]	d [mm]	b [mm]	μ	β	z	As [mm ² /m]	As,min [mm ² /m]	Teräs + k/k	Teräksen sijainti
A-A	49,2	215	500	0,076	0,079	206	274	145	4T10	Yläpintaan
	24,6	215	500	0,038	0,039	211	134	145	3T8	Alapintaan
B-B	22,5	215	1000	0,035	0,035	211	245	291	T8 k170	Yläpintaan
	2,66	215	1000	0,004	0,004	215	29	291	T8 k170	Alapintaan
C-C	12,3	205	1000	0,021	0,021	203	139	277	T8 k180	Yläpintaan
	2,33	205	1000	0,004	0,004	205	26	277	T8 k180	Alapintaan
	4,06	205	1000	0,007	0,007	204	46	277	T8 k180	Alapintaan
D-D	6,15	205	1000	0,010	0,011	204	69	277	T8 k180	Yläpintaan
	1,17	205	1000	0,002	0,002	205	13	277	T8 k180	Alapintaan
	2,03	205	1000	0,003	0,003	205	23	277	T8 k180	Alapintaan
E-E	6,15	215	1000	0,010	0,010	214	66	291	T8 k170	Yläpintaan
	3,07	215	1000	0,005	0,005	214	33	291	T8 k170	Alapintaan
F-F	4,89	205	1000	0,008	0,008	204	55	277	T8 k180	Alapintaan
G-G	11,63	205	1000	0,020	0,020	203	132	277	T8 k180	Alapintaan
H-H	49,2	215	1000	0,076	0,079	206	548	291	T12 k200	Yläpintaan
	50,6	215	1000	0,078	0,082	206	564	291	T12 k200	Alapintaan
I-I	49,2	215	1000	0,076	0,079	206	548	291	T12 k200	Yläpintaan
	50,7	215	1000	0,078	0,082	206	565	291	T12 k200	Alapintaan

Taulukon 6 tuloksista havaitaan, että pidemmät palkkikaistat tarvitsevat kaksinkertaisen raudoitusmäärän laattakaistoihin verrattuna. Tuloksista havaitaan myös, että lähes jokaisessa laattakaistassa vähimmäispääraudoitus oli suurempi kuin kaavalla 10 laskettu raudoitusmäärä. Myös palkkikaistoissa F-F ja G-G vähimmäispääraudoitus oli määräävämpi. Murtorajatila tulee harvoin laattapaksuuden kannalta määrääväksi mitoituskriteeriksi, koska taivutuskestävyys saavutetaan alhaisilla raudoitusmäärillä (Nykyri 2015, s. 11).

5. YHTEENVETO

Teräsbetoni­laatan mitoitus ei ole pelkästään arvojen syöttämistä mitoituksen kaavoihin. Teräsbetonirakenteiden suunnittelu on haastava tehtävä. Rakenteen mitoittajan on hallittava rakenteiden mekaniikka kuten, miten kuormitukset jakautuvat ristiin kantavissa laatoissa sekä miten laatan maksimitaivutusmomentit ja momenttikuvion nollakohdat ratkaistaan haastavissakin rakenteissa. Erityisesti jäykästi tuetut laatat ovat statiikaltaan haastavampia ratkaista kuin vapaasti tuetut laatat, koska vapaasti tuetun rakenteen tukimomentti on nolla. Tasaisesti kuormitetuille ja yleisimmille kuormitustapauksille on olemassa kaavakokoelmia eri lähteissä, joiden avulla voidaan ratkaista helposti rakenteen maksimitaivutusmomentit. Kuitenkin epätasaisesti kuormitetuissa rakenteissa statiikka joudutaan ratkaisemaan käsilaskennalla itse.

Sekä vapaareunallisen, että porrassaukollisen laatan mitoitustapauksissa päädyttiin tilanteeseen, jossa palkkikaistat vaativat enemmän raudoitusta kuin laattakaistat. Esimerkiksi porrassaukollisessa laatasta palkkikaistoihin vaadittu raudoitus­määrä oli noin kaksi kertaa suurempi kuin, mitä laattakaistat vaativat. Laskujen tuloksista havaitaan myös, että yleensä laattakaistoissa minimipääraudoitus­määrä oli määräävämpi kuin mitoitusmomentin määräävä raudoitus­määrä. Se ei ollut poikkeava tapaus, sillä laatan taivutuskestävyys saavutetaan suhteellisen alhaisilla raudoitus­määrillä.

Laatan paksuudella on suuri merkitys vaadittuun teräsmäärään. Rakenteen suunnittelija valitsee laatalle paksuuden palonkestävyys- ja ääneneristävyysstandardien mukaan. Laattakaistojen vaaditun raudoitus­määrän suuruudesta voidaan havaita, että laattakaistojen kohdalta laatan paksuutta olisi voitu pienentää ja palkkikaistojen kohdalla pitää laatan paksuus suurempana, kunhan palonkestävyys- ja ilmanääneneristävyys­määräykset täyttyvät. Toisaalta kandidaatintyössä ei tutkittu laatan leikkauskestävyyttä, joten on vaikea sanoa, kuinka paljon laatan paksuutta voitaisiin pienentää.

Kuormitusten jakautumisen selvittämiseen ristiin kantavissa laatoissa on useita eri menetelmiä. On vaikea sanoa tutkimuksen pohjalta, miten muilla menetelmillä kuormitusten jakautuminen ratkaistaan. Kaistamenetelmä osoittautui toimivaksi ja tehokkaaksi vaihtoehdoksi ainakin tapauksissa, jossa laatasta on aukkoja tai muita vapaita reunoja.

LÄHTEET

Hillerborg, A. (1974). Dimensionering av armerade betongplattor enligt strimlemetoden. Almqvist & Wiksell. Stockholm.

Kerokoski, O. (2017). Betonirakenteiden perusteiden luentomoniste syksy 2017. Tampereen teknillinen yliopisto. Tampere.

Nykyri, P. (2015). Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja 2014. Osa 2. BY-koulutus. Helsinki.

Rakennusmestarien Keskusliitto (1982). Rakentajain kalenteri 1983.

Rakennusmestarien Keskusliitto (1998). Rakentajain kalenteri 1999. Osa 1 Käsikirja.

Rakennustuoteteollisuus RTT ry (2011). Betonirakenteiden suunnittelu eurokoodin mukaan. Osa 3: Laatat. Saatavissa: http://www.eurocodes.fi/1992/paasivu1992/sahkoinen1992/Leaflet_3_Laatat.pdf.

SFS-EN 1990 (2010). Eurokoodi. Rakenteiden suunnitteluperusteet.

SFS-EN 1991-1-1 (2011). Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat. Osa 1-1: Yleiset kuormat, tilavuuspainot, oma paino ja rakennusten hyötykuormat.

SFS-EN 1992-1-1 (2015). Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt.

Suomen betoniyhdistys (1995). Betonirakenteiden perusteiden oppikirja. 4. tark. p. edn. Helsinki: Suomen betonitieto.

Liite A: Porrasaukollisen laatan maksimitaivutusmomentit

Lähtötiedot

Lasketaan maksimitaivutusmomentit porrasaukolliselle teräsbetoni-laatalle, jonka pidempi sivumitta on $L_y = 8$ metriä ja lyhyempi sivumitta $L_x = 6$ m. Porrasaukko sijaitsee laatan keskellä, jonka pidempi sivumitta on 1,8 metriä ja lyhyempi 1,6 metriä. Laatan paksuus $h = 250$ mm.

Mitoituskuorman määrittäminen

Laattaan vaikuttaa oman painon lisäksi välipohjan hyötykuorma, jonka suuruus on $2,0 \text{ kN/m}^2$. Laattaan vaikuttavan kokonaiskuorman mitoitusarvon suuruus on

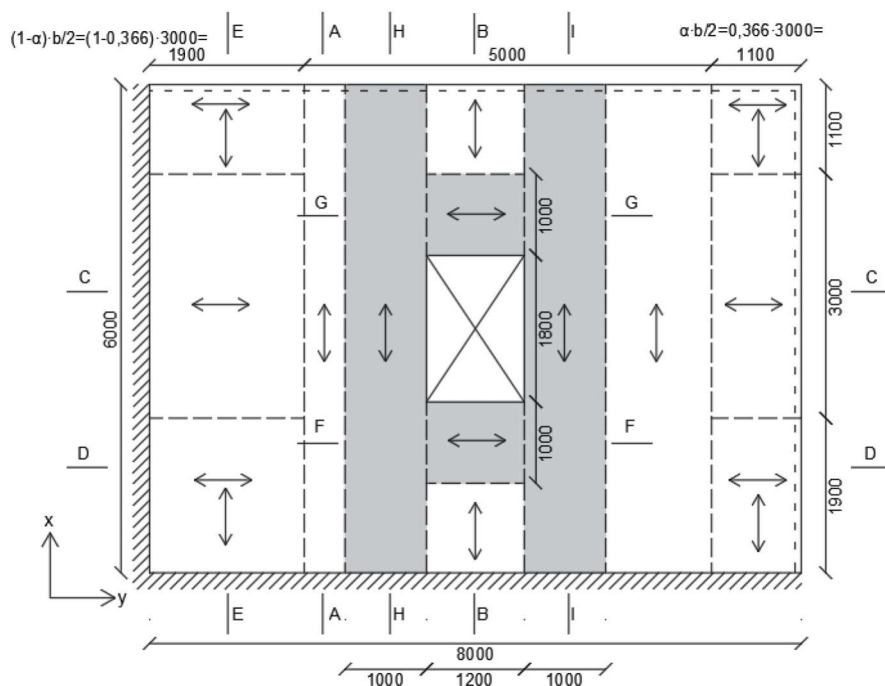
$$q_d = \max \left\{ \begin{array}{l} 1,35 \cdot 25 \text{ kN/m}^3 \cdot 0,25 \text{ m} = 8,44 \text{ kN/m}^2 \\ 1,15 \cdot 25 \text{ kN/m}^3 \cdot 0,25 \text{ m} + 1,5 \cdot 2,0 \text{ kN/m}^2 = 10,2 \text{ kN/m}^2 \end{array} \right. = 10,2 \text{ kN/m}^2$$

Kuormituksen jakautuminen laatta

Arvioidaan laatan lyhyemmän suunnan tuki- ja kenttämomentin suhteeksi $R_m = 2$. Tällöin parametrin α arvoksi saadaan

$$\alpha = \frac{1}{R_m} \cdot (-1 + \sqrt{1 + R_m}) = \frac{1}{2} \cdot (-1 + \sqrt{1 + 2}) = 0,366$$

Parametrin α avulla jaetaan laatta laattakaistoihin. Palkkikaistojen leveydeksi saadaan neljä kertaa laatan paksuus eli 1000 mm. Laatta- ja palkkikaistojen leveydet esitetty alla olevassa kuvassa.



Leikkauksien taivutusmomenttikuviot

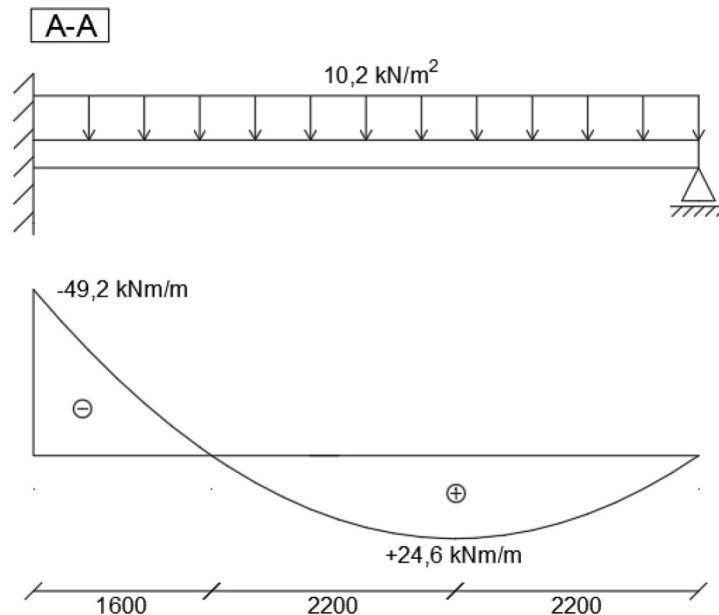
Alla on laskettu laatan eri leikkauksien maksimitaivutusmomentit ja momenttikuvion nollakohta. Merkintä m_{Ns} tarkoittaa tukimomenttia leikkauksessa N-N ja m_{Nf} kenttämomenttia leikkauksessa N-N. Merkintä x_N tarkoittaa kyseisen leikkauksen momenttikuvion nollakohdan sijaintia. Merkintä q_n tarkoittaa palkkikaistalle siirtyvää kuormaa.

Leikkaus A-A

Leikkauksen A-A tuki- ja kenttämomentti lasketaan kaavoilla

$$m_{As} = -(1 - 2\alpha) \cdot \frac{q_d L_x^2}{2} = -(1 - 2 \cdot 0,366) \cdot \frac{10,2 \frac{kN}{m^2} \cdot (6 m)^2}{2} = -49,2 \frac{kNm}{m}$$

$$m_{Af} = \alpha^2 \cdot \frac{q_d L_x^2}{2} = 0,366^2 \cdot \frac{10,2 \frac{kN}{m^2} \cdot (6 m)^2}{2} = 24,6 \frac{kNm}{m}$$



Momenttikuvion nollakohta sijaitsee jäykästä tuesta etäisyydellä

$$x_A = 6 m - 2 \cdot 0,366 \cdot 6 m \approx 1,6 m$$

Leikkaus B-B

Leikkauksen B-B vasemmanpuoleisen rakenteen eli vapaan ulokkeen tukimomentti lasketaan kaavalla

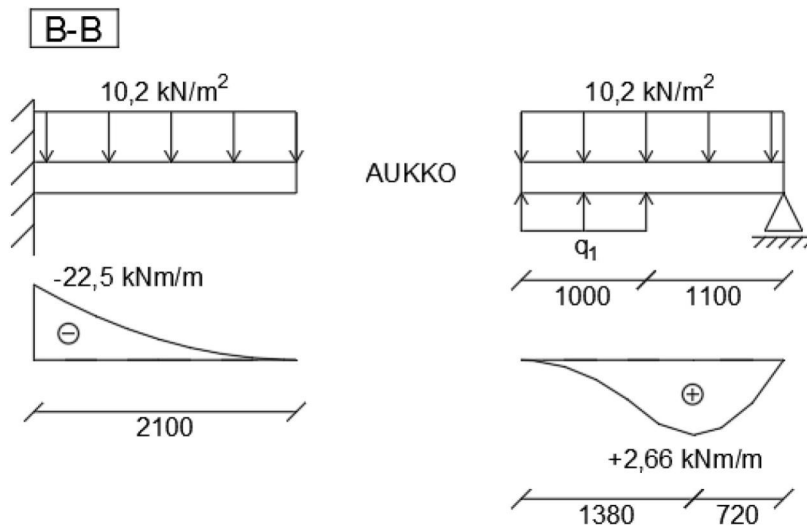
$$m_{Bs} = -\frac{q_d L^2}{2} = -\frac{1}{2} \cdot 10,2 kN/m^2 \cdot (2,10 m)^2 = -22,5 kNm/m$$

Leikkauksen B-B oikeanpuoleisen rakenteen kuljettama kuorma q_1 palkkikaistalle G-G

$$q_1 \cdot 1,0 \text{ m} \cdot 1,6 \text{ m} - 10,2 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot 2,1 \text{ m} \cdot 1,05 \text{ m} = 0 \rightarrow q_1 = 14,0 \text{ kN/m}$$

Leikkauksen B-B oikeapuoleisen rakenteen kenttämomentti, kun kenttämomentti sijaitsee etäisyydellä 0,72 metriä vapaasta tuesta ja vapaan tuen tukivoima $R_B = 7,36 \text{ kN/m}$.

$$m_{Bf} = 7,36 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \cdot 0,72 \text{ m} - \frac{1}{2} \cdot 10,2 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot (0,72 \text{ m})^2 = 2,66 \text{ kNm/m}$$



Leikkaus C-C

Lasketaan leikkauksen C-C vasemmanpuoleisen rakenteen tukimomentti tilanteessa, jossa laatas ei ole aukkoa.

$$m_{cs} = -(1 - 2\alpha) \cdot \frac{q_d L_x^2}{8} = -(1 - 2 \cdot 0,366) \cdot \frac{10,2 \text{ kN/m}^2 \cdot (6 \text{ m})^2}{8} = -12,3 \text{ kNm/m}$$

Vasemmanpuoleisen rakenteen palkkikaistalle H-H kuljettava kuormitus q_2

$$q_2 \cdot 1,0 \text{ m} \cdot 2,9 \text{ m} - \frac{1}{2} \cdot 10,2 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot (1,9 \text{ m})^2 = -12,3 \frac{\text{kNm}}{\text{m}} \rightarrow q_2 = 2,10 \text{ kN/m}$$

Vasemmanpuoleisen rakenteen kenttämomentti, kun kiinnitetyn tuen tukivoima $R_{C,1} = 17,3 \text{ kN/m}$ ja kenttämomentin etäisyys tuesta on 1,69 metriä.

$$m_{cf,1} = -12,3 \frac{\text{kNm}}{\text{m}} + 17,3 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \cdot 1,69 \text{ m} - \frac{1}{2} \cdot 10,2 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot (1,69 \text{ m})^2 = 2,33 \text{ kNm/m}$$

Leikkauksen C-C momenttikuvion nollakohta

$$-12,3 \frac{\text{kNm}}{\text{m}} + 17,3 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \cdot x_c - \frac{1}{2} \cdot 10,2 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot x_c^2 = 0 \rightarrow x_c \approx 1,02 \text{ m}$$

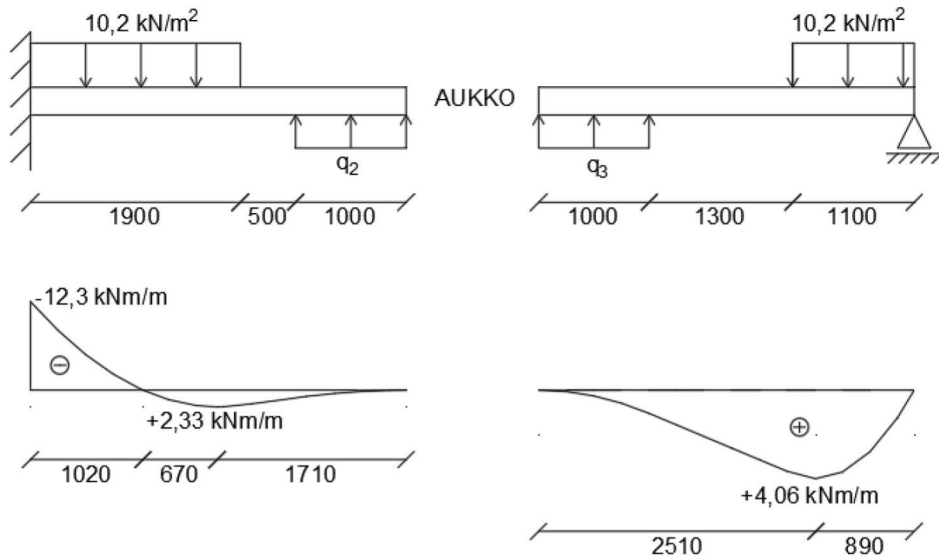
Leikkauksen C-C oikeanpuoleisen rakenteen palkkikaistalle I-I kuljettava kuormitus q_3

$$q_3 \cdot 1,0 \text{ m} \cdot 2,9 \text{ m} - 10,2 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot 1,1 \text{ m} \cdot 0,55 \text{ m} = 0 \rightarrow q_3 = 2,13 \text{ kN/m}^2$$

Oikeanpuoleisen rakenteen kenttämomentti, joka sijaitsee 2,51 metrin etäisyydellä aukon reunasta

$$m_{cf,2} = 2,13 \frac{kN}{m^2} \cdot 1,0 m \cdot 2,01 m - \frac{1}{2} \cdot 10,2 \frac{kN}{m^2} \cdot (0,21 m)^2 = 4,06 kNm/m$$

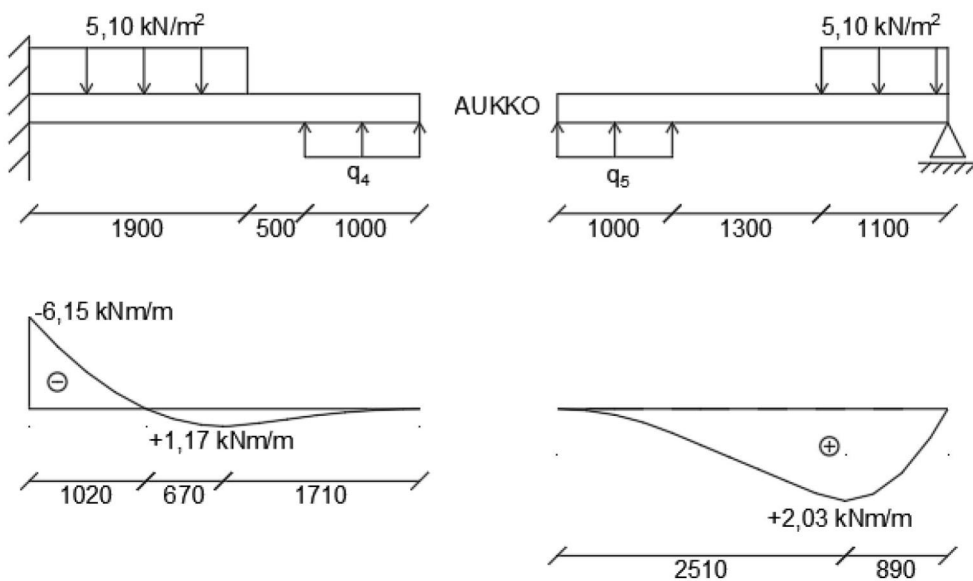
C-C



Leikkaus D-D

Leikkaus D-D on muuten sama kuin leikkaus C-C, mutta laattaan vaikuttavat kuormitukset ja kiinnitetyn tuen momentti ovat puolet pienemmät. Sen vuoksi myös maksimitaivutusmomentti ja palkkikaistoille siirtyvien kuormien suuruudet ovat puolet pienemmät kuin leikkauksessa C-C.

D-D



Leikkaus E-E

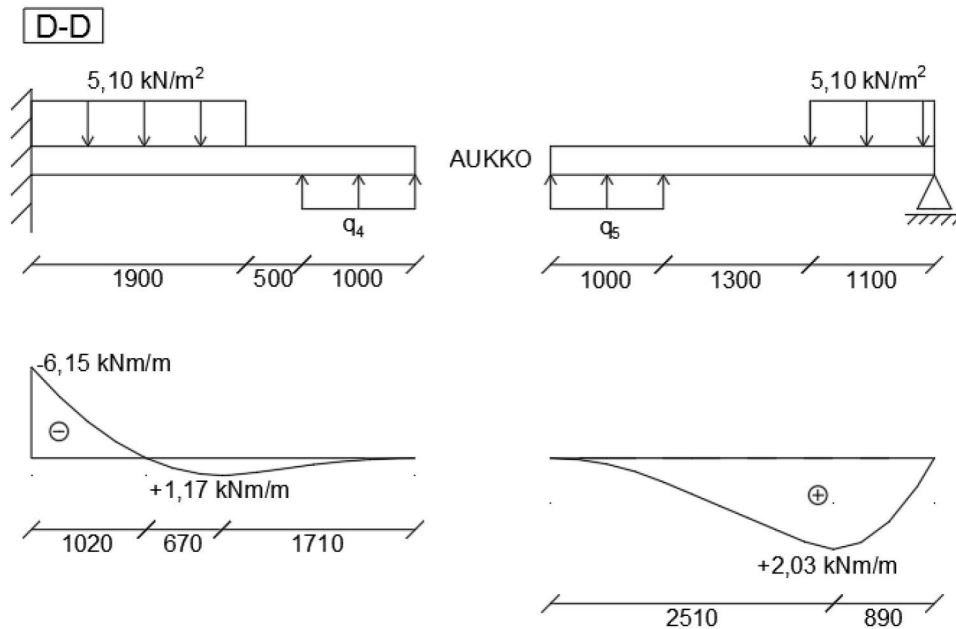
Leikkauksen E-E tuki- ja kenttämomentti lasketaan kaavoilla

$$m_{Es} = -(1 - 2\alpha) \cdot \frac{q_d L_x^2}{8} = -(1 - 2 \cdot 0,366) \cdot \frac{5,10 \frac{kN}{m^2} \cdot (6 \text{ m})^2}{8} = -6,15 \text{ kNm/m}$$

$$m_{Ef} = \alpha^2 \cdot \frac{q_d L_x^2}{8} = 0,366^2 \cdot \frac{5,10 \frac{kN}{m^2} \cdot (6 \text{ m})^2}{8} = 3,07 \text{ kNm/m}$$

Momenttikuvion nollakohta, kun jäykän tuen tukivoima on $R_E = 9,7 \text{ kN/m}$.

$$-6,15 \frac{kNm}{m} + 9,7 \frac{kN}{m} \cdot x_E - \frac{1}{2} \cdot 5,1 \frac{kN}{m^2} \cdot x_E^2 = 0 \rightarrow x_E \approx 0,81 \text{ m}$$



Leikkaus F-F ja G-G

Leikkauksen F-F palkkikaistojen tukivoiman q_6

$$q_6 \cdot 1,0 \text{ m} \cdot 2,7 \text{ m} - 10,2 \frac{kN}{m^2} \cdot 1,2 \text{ m} \cdot 1,6 \text{ m} + q_6 \cdot 1,0 \text{ m} \cdot 0,5 \text{ m} = 0 \rightarrow q_6 = 6,11 \text{ kN/m}^2$$

Leikkauksen F-F kenttämomentti sijaitsee leikkauksen puolivälissä ($x_F = 1,6 \text{ m}$) kuormien symmetrisyydestä johtuen.

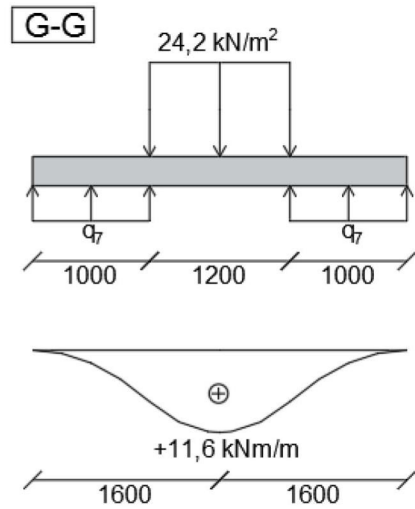
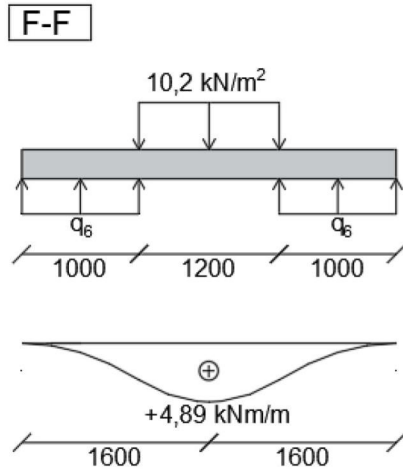
$$m_{Ff} = 6,11 \frac{kN}{m^2} \cdot 1 \text{ m} \cdot 1,1 \text{ m} - 10,2 \frac{kN}{m^2} \cdot 0,6 \text{ m} \cdot 0,3 \text{ m} = 4,89 \text{ kNm/m}$$

Leikkauksen G-G palkkikaistojen tukivoima q_7

$$q_7 \cdot 1,0 \text{ m} \cdot 2,7 \text{ m} - 24,2 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot 1,2 \text{ m} \cdot 1,6 \text{ m} + q_6 \cdot 1,0 \text{ m} \cdot 0,5 \text{ m} = 0 \rightarrow q_6 = 14,5 \text{ kN/m}^2$$

Leikkauksen G-G kenttämomentti sijaitsee myös leikkauksen puolivälissä

$$m_{Gf} = 14,5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot 1 \text{ m} \cdot 1,1 \text{ m} - 24,2 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot 0,6 \text{ m} \cdot 0,3 \text{ m} = 11,6 \text{ kNm/m}$$



Leikkaus H-H

Oletetaan, että palkkikaistan H-H tukimomentti on $m_{Hs} = -49,16 \text{ kNm/m}$. Leikkauksen H-H vapaan tuen tukireaktio lasketaan kaavalla

$$R_{H,1} \cdot 6 \text{ m} - 10,2 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot 6 \text{ m} \cdot 3 \text{ m} - 1,05 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot 1,1 \text{ m} \cdot 5,45 \text{ m} - 2,10 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot 3 \text{ m} \cdot 3,4 \text{ m} - \\ 1,05 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot 1,9 \text{ m} \cdot 0,95 \text{ m} - 6,11 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot 1,0 \text{ m} \cdot 1,6 \text{ m} - 14,5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot 1,0 \text{ m} \cdot 4,4 \text{ m} - \\ 49,2 \frac{\text{kNm}}{\text{m}} \rightarrow R_{H,1} = 39,6 \text{ kN/m}$$

Kiinnitetyn tuen tukireaktio

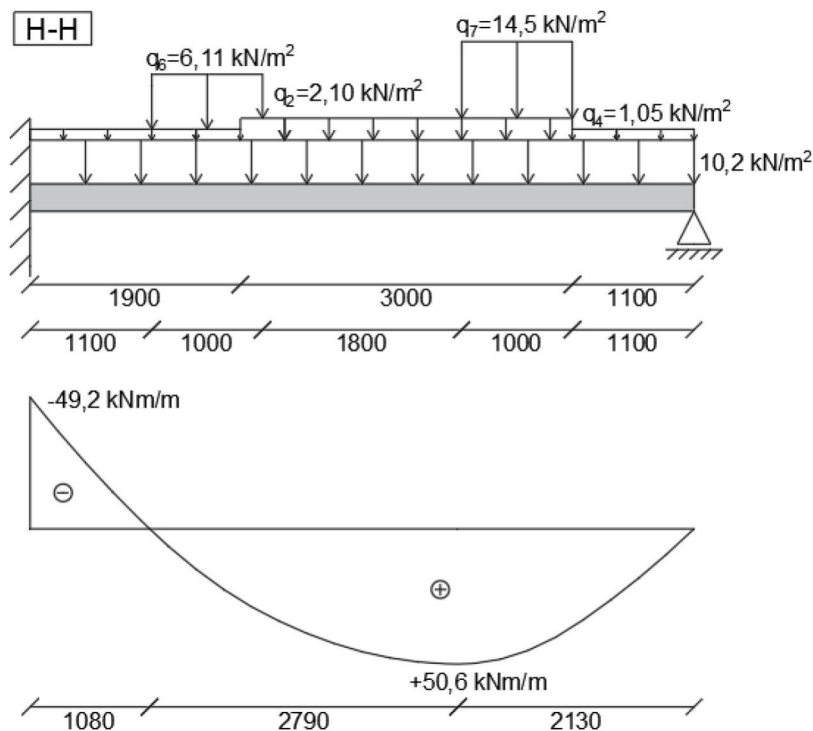
$$R_{H,2} = 51,7 \text{ kN/m}$$

Palkkikaistan H-H kenttämomentti sijaitsee 3,87 metrin etäisyydellä jäykästä tuesta. Kenttämomentti tässä kohdassa on

$$m_{Hf} = -49,2 \frac{\text{kNm}}{\text{m}} + 51,6 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \cdot 3,87 \text{ m} - 11,2 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot 1,1 \text{ m} \cdot 3,32 \text{ m} - 17,4 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot 0,8 \text{ m} \cdot \\ 2,37 \text{ m} - 18,4 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot 0,2 \text{ m} \cdot 1,87 \text{ m} - 12,3 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot 1,77 \text{ m} \cdot \frac{1,77 \text{ m}}{2} = 50,6 \frac{\text{kNm}}{\text{m}}$$

Palkkikaistan H-H momenttikuvion nollakohdan etäisyys jäykästä tuesta

$$-49,2 \frac{\text{kNm}}{\text{m}} + 51,6 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \cdot x_H - \frac{1}{2} \cdot 11,2 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot x_H^2 = 0 \rightarrow x_H = 1,08 \text{ m}$$



Leikkaus I-I

Oletetaan myös leikkauksessa I-I, että tukimomentti on $m_{I_s} = -49,16 \text{ kNm/m}$. Vapaan tuen tukireaktio lasketaan kaavalla

$$\begin{aligned} R_{I,1} \cdot 6 \text{ m} - 11,3 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot 1,1 \text{ m} \cdot 5,45 \text{ m} - 26,7 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot 1 \text{ m} \cdot 4,4 \text{ m} - 12,3 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot 1,8 \text{ m} \cdot 3 \text{ m} - \\ 18,4 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot 0,2 \text{ m} \cdot 2 \text{ m} - 17,4 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot 0,8 \text{ m} \cdot 1,5 \text{ m} - 11,3 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot 1,1 \text{ m} \cdot 0,55 \text{ m} = \\ -49,2 \frac{\text{kNm}}{\text{m}} \rightarrow R_{I,1} = 39,7 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

Kiinnitetyn tuen tukireaktio

$$R_{I,2} = 51,7 \text{ kN/m}$$

Palkkikaistan I-I kenttämomentti sijaitsee 3,87 metrin etäisyydellä jäykästä tuesta. Kenttämementti tässä kohdassa on

$$\begin{aligned} m_{If} = -49,2 \frac{\text{kNm}}{\text{m}} + 51,7 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \cdot 3,87 \text{ m} - 11,3 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot 1,1 \text{ m} \cdot 3,32 \text{ m} - 17,4 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot 0,8 \text{ m} \cdot \\ 2,37 \text{ m} - 18,4 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot 0,2 \text{ m} \cdot 1,87 \text{ m} - 12,3 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot 1,77 \text{ m} \cdot \frac{1,77 \text{ m}}{2} = 50,7 \frac{\text{kNm}}{\text{m}} \end{aligned}$$

Palkkikaistan I-I momenttikuvion nollakohdan etäisyys jäykästä tuesta

$$-49,2 \frac{\text{kNm}}{\text{m}} + 51,7 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \cdot x_H - \frac{1}{2} \cdot 11,3 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot x_H^2 = 0 \rightarrow x_H = 1,08 \text{ m}$$

